



Maria Steiner, Michael Theiler & Mahsa Mirboland (Hrsg.)

Forum Bauinformatik 2018

von jungen Forschenden für junge Forschende

**Bauhaus-
Universität
Weimar**

**Professur Informatik im Bauwesen
Bauhaus-Universität Weimar**



30. Forum Bauinformatik

von jungen Forschenden für junge Forschende

Maria Steiner, Michael Theiler & Mahsa Mirboland (Hrsg.)

Tagungsband 30. Forum Bauinformatik

19.-21. September 2018, Weimar

Informatik im Bauwesen, Bauhaus-Universität Weimar

Mit freundlicher Unterstützung durch:

Bauhaus-Universität Weimar



WBA | Bauhaus Weiterbildungs-
akademie Weimar e.V.
Institut an der
Bauhaus-Universität Weimar

Copyright © 2018

Alle Rechte vorbehalten. Die Überführung in maschinenlesbare Form sowie das Speichern in Informationssystemen, auch auszugsweise, ist nur mit schriftlicher Genehmigung der Herausgeber gestattet.

Maria Steiner, Michael Theiler & Mahsa Mirboland (Hrsg.)

Professur Informatik im Bauwesen

Bauhaus-Universität Weimar

Informatik im Bauwesen

Coudraystraße 7

99423 Weimar

Tel.: +49 3643 58 4215

Fax: +49 3643 58 4216

E-Mail: bauinf@bauing.uni-weimar.de

DOI <https://doi.org/10.25643/bauhaus-universitaet>

ISBN 978-3-00-060726-4

Druck

Blueprint. e.K.

Karl-Liebknecht-Straße 17

99423 Weimar

www.blueprint-weimar.de

Vorwort

Die Bauhaus-Universität Weimar ist seit langer Zeit mit dem Forum Bauinformatik eng verbunden. So wurde die Veranstaltung 1989 hier durch den Arbeitskreis Bauinformatik ins Leben gerufen und auch das 10. und 18. Forum Bauinformatik (1998 bzw. 2006) fanden in Weimar statt. In diesem Jahr freuen wir uns deshalb besonders, das 30. Jubiläum an der Bauhaus-Universität Weimar ausrichten zu dürfen und viele interessierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Bereich der Bauinformatik in Weimar willkommen zu heißen.

Das Forum Bauinformatik hat sich längst zu einem festen Bestandteil der Bauinformatik im deutschsprachigen Raum entwickelt. Dabei steht es traditionsgemäß unter dem Motto „von jungen Forschenden für junge Forschende“, wodurch insbesondere Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern die Möglichkeit geboten wird, ihre Forschungsarbeiten zu präsentieren, Problemstellungen fachspezifisch zu diskutieren und sich über den neuesten Stand der Forschung zu informieren. Zudem wird eine ausgezeichnete Gelegenheit geboten, in die wissenschaftliche Gemeinschaft im Bereich der Bauinformatik einzusteigen und Kontakte mit anderen Forschenden zu knüpfen.

In diesem Jahr erhielten wir 49 interessante und qualitativ hochwertige Beiträge vor allem in den Themenbereichen Simulation, Modellierung, Informationsverwaltung, Geoinformatik, Structural Health Monitoring, Visualisierung, Verkehrssimulation und Optimierung. Dafür möchten wir uns ganz besonders bei allen Autoren, Co-Autoren und Reviewern bedanken, die durch ihr Engagement das diesjährige Forum Bauinformatik erst möglich gemacht haben. Wir danken zudem Professor Große und Professor Díaz für die Unterstützung bei der Auswahl der Beiträge für die Best Paper Awards.

Ein herzliches Dankeschön geht an die Kollegen an der Professur Informatik im Bauwesen der Bauhaus-Universität Weimar für die organisatorische, technische und beratende Unterstützung während der Planung der Veranstaltung.

Weimar, September 2018

Maria Steiner, Michael Theiler & Mahsa Mirboland

Wir bedanken uns bei unserem Hauptsponsor:



sowie bei unseren weiteren Sponsoren:



Inhaltsverzeichnis

Keynotes.....	11
<i>J.-F. Köhle & J. Díaz:</i> Optimierung von UAV-Trajektorien komplexer baulicher Anlagen als Grundlage photogrammetrischer 5D-Bauwerks-Modelle	13
<i>W. Muck:</i> Stillstand ist Rückschritt – Digitale Innovationen im Planungsbüro umsetzen.....	21
<i>A. Carstens:</i> BIM and GIS – Gebäude und Infrastruktur im digitalen Raumbezug	29
<i>P. A. Brazhnikov & P. D. Chelyshkov:</i> Features of BIM-modeling of engineering systems of the construction object.....	39
Session 1: Simulation und Modellierung 1.....	45
<i>T. Behnke:</i> Building Information Modeling – Early- und Late-Adopter	47
<i>S. Badar:</i> Existing Situation of BIM in Academia in Germany and Guidelines for Future.....	55
<i>M. Boxheimer, D. Max & A. Geiger:</i> Eingabedaten für eine IFC-gestützte Brandsimulationsrechnung.....	61
<i>A. Ellinger:</i> Ansätze zur halbautomatischen Bestandsbrückenmodellierung	69
<i>R. Wollenberg:</i> BIM für das Bestandsimmobilienmanagement	77
Session 2: Simulation und Modellierung 2.....	87
<i>J. Taraben & M. Helmrich:</i> Methode zur automatisierten Verortung von Inspektionsdaten aus bildbasierten Bauwerksprüfungen.....	89
<i>P. Häringer & G. Pavlidis:</i> Automatisiertes und regelbasiertes Element-Splitting in digitalen Bauwerksmodellen.....	97
<i>F. Lin & N. T. Luu:</i> An Algorithm to Generate and Process the Variation Model for Mass Simulation.....	105
<i>K. Vryonis:</i> BIM für den Brückenbau: LoD-Konzept und FEA-Workflow in der Tragwerksplanung	113
<i>M. Artus:</i> Konzept eines Digital Twins für Gebäude unter Verwendung von Smart Home Elementen	121
<i>P. Merz & L. Böger:</i> Das Angebot der TU9 im Bachelor-Studiengang Bauingenieurwesen zur angewandten Informatik.....	129
Session 3: Informationsverwaltung und Datenmodellierung 1.....	137
<i>A. Miehllich, B. Krämer & C. Wirtz:</i> Herausforderungen bei der Akquirierung, Übertragung, Bereitstellung und Qualitätssicherung von großen Monitoringdatensmengen.....	139
<i>P. Hagedorn:</i> Implementation of a Validation Framework for the Information Container for Data Drop.....	147
<i>F. Eickeler:</i> „Die schönsten Bahnstrecken Deutschlands“ zu IFC-Alignment	155

N. Hein: Multimodales Datenbanksystem als Basis zur Verwaltung und Visualisierung großvolumiger spatio-temporaler Umweltdaten – Umsetzung am Beispiel des Projektes RiverView..... 165

Session 4: Informationsverwaltung und Datenmodellierung 2.....173

D. Steiner: Formulierung und Generierung von Expertenwissen zur Entwicklung intelligenter Ersatzmodelle für die Tragwerksplanung in frühen Entwurfsphasen 175

C. Di Biccari & D. Heigener: Semantic modeling of wastewater treatment plants towards international data format standards 183

A. Wagner, L.K. Möller & C. Leifgen: SolConPro: Verteilte Produktdatenkataloge mit automatisierter Datenverarbeitung 191

C. Leifgen: Digitale Taktsteuerungstafel zur Unterstützung einer Lean Construction-basierten und digitalen Arbeitsweise 199

M. Trzeciak: Towards Registration of Construction Drawings to Building Information Models 207

Session 5: Simulation und Modellierung 3 / Geoinformatik.....215

D. Kunz & A. Geiger: Automatisierte Generierung eines 3D-Baumkatasters am Beispiel des KIT Campus Nord..... 217

J. Martens: LaserKit – Ein Framework für effiziente Punktwolkenverarbeitung 225

B. Wittor: Zur Simulation von faserverstärkten Klebstoffen..... 231

C. Schadow & D. Luckey: Anwendung visueller Programmiersprachen bei der Steuerung von virtuellen Fertigungsrobotern 239

Š. Markič, J. Schlenger & I. Bratoev: Tangible Alignment Design..... 247

M. Alalade: An enhanced full waveform inversion (FWI) application to damage identification in dams..... 255

Session 6: Structural Health Monitoring.....263

M. Steiner, H. Fritz, L. Thiebes & K. Dragos: Fault diagnosis in wireless structural health monitoring systems based on support vector regression 265

A.-H. Hamdan: Generierung eines Tragwerkmodells basierend auf IFC-Daten für geschädigte Brücken..... 273

S. Ibáñez & K. Dragos: Quality indicators for embedded stochastic subspace identification algorithms in wireless structural health monitoring systems..... 281

E. Harirchian & A. Harirchian: Earthquake Hazard Safety Assessment of Buildings via Smartphone App: An Introduction to the Prototype Features 289

S. Karimi, B. Mehrkian Jorshari, E. Mousazadeh, M. Steiner & K. Dragos: Comparative study of experimentally tested tuned liquid column dampers..... 297

Session 7: Visualisierung 1.....305

K. Jahr & A. Braun: Maschinelles Sehen für die automatische Erkennung von Baubehelfen 307

B. Özcan: Kamerabasierte Rauigkeitsbestimmung von Bauteiloberflächen..... 317

A. W. Gena: Schlieren Imaging and Analyzing 323

<i>C. Eller & S. Zhang</i> : Kostengünstige VR-Plattform zur Visualisierung und Begehung von komplexen 3D-Modellen.....	331
Session 8: Visualisierung 2 / Verkehrssimulation	339
<i>F. Meister</i> : Automatische Generierung von Baummodellen.....	341
<i>L.-M. Krenz</i> : Implementierung einer durchgängigen, redundanzfreien Informationsaustausch- methodik mittels BCF-Dateien in ein CAD-Programm	349
<i>N. Diekmann & C. Schiermeyer</i> : Modellierung und Simulation von ÖPNV auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen	357
<i>M. Shi</i> : Optimierung der Baustelleneinrichtung anhand gemischtganzzahliger Programmierung und evolutionärer Algorithmen.....	365
<i>M. Fedior & W. Hamel</i> : Simulationsumgebung zur Evaluation von umweltorientierten Verkehrsmanagement-Strategien	373
Session 9: Optimierung.....	379
<i>I. Reichert</i> : Optimal sensor placement under consideration of different measurement error types....	381
<i>A. Hoffmann</i> : Optimierungsverfahren zur Kalibrierung Typologie-basierter energetischer Gebäudemodelle	389
<i>Z. Jaouadi</i> : Shape optimization and performance check of streamlined bridge deck	397
<i>K. Riga, K. Jahr & T. Dusch</i> : Baustelleneinrichtungsplanung mittels Ganzzahliger Optimierung....	405
<i>T.-J. Huyeng</i> : Modifizierung eines kapazitiven Temperatur-Feuchte-Sensors zur Verwendung im Hochfeuchtebereich	413



Weltweit realisiert HOCHTIEF herausragende Bauprojekte. Dabei beschäftigen wir uns schon heute mit den Lösungen von morgen und setzen auf zukunftsweisende Bau- und Planungsmethoden: Neben Building Information Modeling (BIM) stehen künstliche Intelligenz, Automatisierung oder 3D-Druck im Fokus. So gestalten wir effiziente Prozesse, von denen alle Stakeholder profitieren. Die Zukunft des Bauens ist digital.
www.hochtief.de

Wir bauen die Welt von morgen.





Das Kompetenznetzwerk für Building Information Modeling

www.buildingSMART.de

Forum Bauinformatik

- | | | | |
|------|---|------|--|
| 1989 | Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen | 2005 | Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Bauinformatik |
| 1990 | Brandenburgische Technische Universität Cottbus | 2006 | Bauhaus-Universität Weimar, Professur Informatik im Bauwesen |
| 1991 | Technische Universität Berlin | 2007 | Technische Universität Graz, Institut für Bauinformatik |
| 1992 | Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen | 2008 | Technische Universität Dresden, Institut für Bauinformatik |
| 1993 | Technische Universität München, Fachgebiet Bauinformatik | 2009 | Universität Karlsruhe, Institut für Industrielle Bauproduktion und Entwerfen |
| 1994 | Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen | 2010 | Technische Universität Berlin, Fachgebiet Bauinformatik, Institut für Bauingenieurwesen |
| 1995 | Universität Hannover, Institut für Bauinformatik | 2011 | University College Cork, Informatics Research Unit for Sustainable Engineering |
| 1996 | Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Bauinformatik | 2012 | Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen |
| 1997 | Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Computeranwendungen im Bauwesen | 2013 | Technische Universität München, Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation, Lehrstuhl für Architekturinformatik |
| 1998 | Bauhaus-Universität Weimar, Professur Informatik im Bauwesen | 2014 | Technische Universität Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen |
| 1999 | Technische Universität Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen | 2015 | Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Geodätisches Institut, Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme |
| 2000 | Technische Universität Berlin, Theoretische Methoden der Bau- und Verkehrstechnik, Institut für Bauingenieurwesen | 2016 | Leibniz Universität Hannover, Institut für Risiko und Zuverlässigkeit |
| 2001 | Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauinformatik | 2017 | Technische Universität Dresden, Institut für Bauinformatik |
| 2002 | Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen | 2018 | Bauhaus-Universität Weimar, Professur Informatik im Bauwesen |
| 2003 | Universität Hannover, Institut für Bauinformatik | | |
| 2004 | Technische Universität Braunschweig, Institut für Computeranwendungen im Bauingenieurwesen | | |

Keynotes

Optimierung von UAV-Trajektorien komplexer baulicher Anlagen als Grundlage photogrammetrischer 5D-Bauwerks-Modelle

Jan-Friedrich Köhle¹ und Joaquín Díaz²

¹Fachbereich Bau; Bauinformatik und Nachhaltiges Bauen · Technische Hochschule Mittelhessen ·
Wiesenstr. 14 · 35390 Gießen

E-Mail: jan-friedrich.koehle@bau.thm.de

² Fachbereich Bau; Bauinformatik und Nachhaltiges Bauen · Technische Hochschule Mittelhessen ·
Wiesenstr. 14 · 35390 Gießen

E-Mail: diaz@bau.thm.de

Die digitale Erfassung komplexer baulicher Anlagen mittels UAV ist im gesamten Bauprozess nicht mehr wegzudenken. Die hierfür notwendige Befliegung stellt hohe Anforderungen an UAV-Piloten und wird von derzeit verfügbaren Planungswerkzeugen für Trajektorien nur unzureichend abgebildet. In diesem Paper wird ein iteratives Verfahren vorgestellt, mit dessen Hilfe bauliche Anlagen mit komplexen Geometrien unter Berücksichtigung von räumlichen Hindernissen und den Anforderungen der Photogrammetrie teilautomatisch und effizient erfasst werden können.

Keywords: UAV, BIM, Photogrammetrie

1 Einleitung

Photogrammetrische Erfassungen mit Unmanned Aerial Vehicles (UAV) bieten großes Potential bei der Abbildung komplexer baulicher Anlagen und Infrastrukturen sowie derer Bauzustände. Die erzeugten Oberflächenmodelle haben eine hohe optische Qualität und weisen eine ausreichende Genauigkeit für eine Vielzahl von messtechnischen Anwendungen auf. Sie werden häufig für die Erstellung von Bestandsmodellen genutzt, können aber auch zur rechtssicheren Dokumentation durch regelmäßige Erfassung des Baufortschritts (4D-Modell) genutzt werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die präzise Ermittlung von Mengen (z.B. Erdbau) und die damit verbundene Kostenplanung (5D-Modell). Eine optimierte Befliegung kann als Grundlage für automatisierte Mengenermittlungen herangezogen werden.

Eine Herausforderung an die Piloten stellen allerdings komplexe Geländesituationen mit vertikalen Elementen (z.B. Wände) dar, da derzeit verfügbare Planungswerkzeuge im Regelfall nur eine ebenen-basierte Planung von Flugrouten ohne Berücksichtigung von Hindernissen ermöglichen, sodass eine manuelle Steuerung des UAV notwendig wird.

Im Rahmen dieses Papers wird ein iteratives Verfahren für die Befliegung von unbekannten komplexen baulichen Anlagen entwickelt, welches eine weitgehend automatisierte Erfassung ermöglicht. Durch den iterativen Prozess findet auch eine Berücksichtigung vorab nicht bekannter Hindernisse statt.

Ziel des Verfahrens ist es, neben der Automatisierung eine Gewährleistung hoher Modellqualität durch Berücksichtigung der Anforderungen der Photogrammetrie. Durch das vorgestellte Verfahren soll die Befliegung beliebiger Gelände bzw. komplexer baulicher Anlagen

weitgehend automatisch erfolgen, sodass im Vergleich zu klassischen Verfahren der Pilot möglichst nicht manuell eingreifen muss, da im Prozess vertikale Elemente erkannt werden und daher die Hindernisse weitgehend automatisiert umflogen werden können. Als Resultat kann die photogrammetrischen Erfassungen schneller und damit kostengünstiger erstellt werden.

1.1 Photogrammetrische Erfassungen mit UAV

Im Kontext dieser Ausarbeitung ist unter Photogrammetrie die Structure from Motion (SfM)-Methode zu verstehen. Dabei wird ein Objekt aus verschiedenen Standorten mit konventioneller Kameratechnik aufgenommen und anschließend werden mittels photogrammetrischer Algorithmen aus dem erzeugten Bildverband dreidimensionale Punkte generiert. Die erzeugte Punktwolke ist maßstabslos, kann aber auf Grundlage der Positionsinformationen des UAV und mit Hilfe von konventionell eingemessenen Passpunkten georeferenziert werden. (WESTOBY ET AL. 2012)

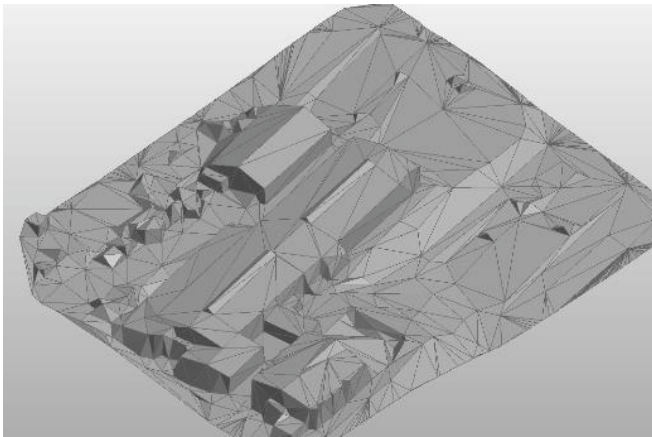


Abb. 1:
Typische komplexe Geländesituation mit zu erfassenden vertikalen Elementen

Eines der entscheidenden Kriterien für hochwertige Ergebnisse ist die Kameraausrichtung in Gegenrichtung zum Normalenvektor der aufzunehmenden Fläche. Dieses Vorgehen vermeidet schleifende Schnitte bei der Berechnung und trägt somit maßgeblich zur geometrischen Korrektheit des Ergebnisses bei (AGISOFT 2018). Neben diesem geometrischen Kriterium spielen auch Bildschärfe, gute Kontrastverhältnisse und niedrigem Rauschen der Aufnahme etc. eine wichtige Rolle, da diese Parameter für die photogrammetrischen Algorithmen (besonders: SIFT; Scale-invariant feature transform) von besonderer Relevanz sind (LINDEBERG 2012).

1.2 Systemische Beschreibung des UAV

Bei dem zu Grunde liegenden Unmanned Aerial Vehicle (UAV) handelt es sich um Hexacopter bestehend aus einem Grundkorpus, welcher in sechs Freiheitsgraden im Raum bewegt werden kann (Translation und Rotation in/um die X-, Y-, Z-Achsen im kartesischen Koordinatensystem). Weiterhin verfügt das UAV über eine mit Hilfe eines s.g. Gimbals in drei Freiheitsgraden steuerbare Kamera (Rotation um X, Y, Z). Abbildung 2 visualisiert den Aufbau.

Das System ermöglicht (teil-)autonome Befliegungen auf Grundlage vorprogrammierter Flugrouten und kann live durch eine Bodenstation oder manuell durch den Piloten navigiert werden.



Abb. 2:
UAV mit Bedienteil für Piloten (nicht
abgebildet: Bodenstation)

1.3 Stand der Technik

Die Einsatzmöglichkeiten von UAV in Ausprägung eines Multicopters werden derzeit aus der Sichtweise verschiedener Fachgebiete untersucht. Im Rahmen dieser Ausarbeitung steht die praxisnahe Anwendung der Technologien im Bauwesen im Vordergrund.

Zu den Teilaspekten dieser Ausarbeitung liegt eine Reihe von Arbeiten vor. Z.B. wird der Einsatz von UAV im Bauwesen ausführlich von (MORGENTHAL ET AL. 2015) beschrieben und praktisch erprobt. (ACHILL ET AL. 2015) liefert ein Praxisprojekt mit Fokus auf der Erfassung vertikaler Flächen im Bauwesen, definiert die Aufnahmepositionen aber manuell. (ALDSIK 2012) beschreiben ein mehrstufiges Optimierungsverfahren für photogrammetrische Auswertungen ohne den Einsatz von UAV. Andere Autoren schlagen grundlegende automatisierte, nicht optimierte Konzepte zur Befliegung von BIM-Modellen vor wie (FREIMUTH 2015). Einen Einblick in die Nutzbarkeit der Daten im gesamten Bauprozess liefert (MORGENTHAL 2016).

Ähnliche Anforderungen wie das Bauwesen stellt in diesem Bereich auch die Archäologie, sodass auch in diesem Feld einige Praxisberichte verfügbar sind, z.B.: (EISENBEIB 2009)

Photogrammetrische Verfahren sind besonders in der Geographie etabliert, sodass hier eine Reihe von Konzepten zur Implementierung (teil-)automatisierter Verfahren vorliegt. Allerdings fehlt hier die Berücksichtigung vertikaler Elemente. Der Fokus liegt auf der Generierung von Höhenmodellen und Orthophotos.

2 Lösungsstrategie

Zur Lösung des beschriebenen Problems wird ein iterativer Ansatz gewählt. Jeder Iterationsschritt entspricht dabei einer Befliegung. Ziel ist es, die erzeugte Modellqualität mit jeder Befliegung zu verbessern.

Der erste Iterationsschritt entspricht dabei einer in horizontalen Ebenen mäandernden Befliegungsstrategie wie sie von marktüblichen Planungswerkzeugen angeboten wird (z.B. QGroundControl 2018). Die notwendigen Parameter (Abstand der Aufnahmepositionen) resultieren aus der geforderten Auflösung der Punktwolke und den Eigenschaften der Kamera

(u.a. Größe des Sensors, Brennweite des Objektivs) sowie sicherheitstechnischen Überlegungen (Mindestabstände). Die Kamera wird orthogonal zum Horizont ausgerichtet. Abbildung 3 zeigt eine typische Flugroute.



Abb. 3:

Mäandernde Flugroute in horizontaler Ebene generiert durch QGroundControl

Kartendaten: ©2018 GeoBasis-DE/BKG (©2009), Google Bilder © 2018 AeroWest

Auf Grundlage dieser ersten Befliegung wird mit Hilfe photogrammetrischer Softwarewerkzeuge (z.B. Agisoft Photoscan, Autodesk Forge Reality Capture) ein Geländemodell generiert, welches als Grundlage für die weiteren Befliegungen dient.

Dieses Geländemodell dient als Grundlage für die Generierung der weiteren Aufnahmepositionen und Trajektorien, weist aber noch geometrische und optische Mängel auf. Besonders vertikale Elemente werden durch diese Vorgehensweise nicht in der notwendigen Auflösung erfasst, sind aber für die weitere Nutzung des Modells essentiell. Abbildung 4 zeigt ein entsprechendes Beispiel.



Abb. 4:

Unvollständig erfasste Wand, Screenshot Autodesk Recap, eigener Datensatz

2.1 Generierung der räumlichen Aufnahmepositionen

Für die Generierung der räumlichen Aufnahmepositionen (AP) der Kamera wird ein Geländemodell als 2,5D-polygonales Oberflächenmodell (ohne Überscheidungen) genutzt. Wie auch bei der Konstruktion der ebenen AP bestimmen die Kameraeigenschaften und

gewünschte Auflösung maßgeblich die Distanz zwischen den AP. Die AP-Zielpunkte werden unter Berücksichtigung der Topographie auf dem Oberflächenmodell platziert. Ausgehend von den Zielpunkten werden die eigentlichen AP im definierten Abstand zum Oberflächenmodell durch Translation in Richtung des Normalenvektors zur jeweiligen Polygonebene, auf dem sich der AP-Zielpunkt befindet, berechnet. Der Abstand muss dabei größer sein als ein vorzugebender Sicherheitsabstand. Der zur Translation genutzte Normalenvektor wird in Gegenrichtung als Kameraausrichtung an der jeweiligen AP gespeichert.

2.2 Erzeugung der räumlichen Trajektorie

Die Optimierung der Flugroute zwischen den AP stellt eine Variation des Optimierungsproblems „Problem des Handlungsreisenden“ (Travelling Salesman Problem, TSP) dar. Ziel der Optimierung ist es, das Besuchen einer Menge von Orten mit möglichst geringer Gesamtstrecke durch einen Handlungsreisenden. Übertragen auf das Szenario dieser Ausarbeitung soll das UAV eine Menge von Aufnahmepositionen abfliegen mit möglichst geringem Gesamtenergiebedarf.

Zur mathematischen Abbildung werden die AP als Knoten eines gerichteten, kantengewichteten Graphens erfasst. Die Summe der Kantengewichte der optimalen Trajektorie stellt den Gesamtenergiebedarf der Trajektorie dar. Es wird vorausgesetzt, dass die Flugmanöver bei konstant vorgegebener Flugeschwindigkeit durchgeführt werden.

Der Energiebedarf (Elektrische Ladung) Q_{man} [Ah] pro Flugmanöver/ Kante wurde empirisch in Anlehnung an (DIETRICH, KRUG & ZIMMERMANN 2017) ermittelt und ergibt sich abhängig von Distanz d [m] und angestrebter Flugrichtung zur Horizontalen (Höhen- bzw. Tiefenwinkel) β [°] zu:

$$Q_{man}(d, \beta) = \begin{cases} (4 \cdot 10^3 - 6x^3 + 0,0002x^2 - 0,0352x \\ \quad + 0,6138) \cdot d, & \beta < 0 \\ (-6 \cdot 10^{-6} - 6x^3 + 0,0005x^2 + 0,0207x \\ \quad + 0,5938) \cdot d, & \beta \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Die Durchführung von Befliegungen mit anschließender Auswertung der Messungen hat ergeben, dass die eventuell notwendige Rotation des UAV um die Z-Achse sowie Bewegungen des Gimbals zur Kameraausrichtung keinen relevanten Einfluss auf den Energiebedarf pro Flugmanöver haben. Q_{man} wurde spezifisch für das vorgestellte UAV ermittelt.

Es werden nur Kanten berücksichtigt, welche über ihre gesamte Länge den Mindestabstand d_{min} zum vorgegebenen Gelände einhalten und keine Überschneidung mit dem Gelände aufweisen.

Die mathematische Lösung des TSP ist nicht Ziel dieser Ausarbeitung, da ausreichend verfügbare Solver vorliegen.

2.3 Prototypische Implementierung

Zur prototypischen Implementierung wurden die Werkzeuge Autodesk Revit, Dynamo und Forge Reality Capture API herangezogen. Als Solver für das TSP die Google Optimization Tools (OR-Tools) als Python Bibliothek. Die Toolchain gewährleistet eine effiziente Entwicklung im Kontext des BIM und auf effizienten Zugriff auf Gebäudemodelle.

Um die ermittelte Flugroute nutzen zu können, ist eine Reihe von Anpassungen notwendig. Unter anderem müssen die lokalen Koordinaten in die von dem UAV Flightcontroller erwarteten, geodätischen Referenzsystem (World Geodetic System 1984, WGS 84) übertragen werden und die vektoriell vorhandenen Kameraausrichtungen müssen in eine relative Winkelangabe zur Ausrichtung des UAV auf der Trajektorie umgerechnet werden.

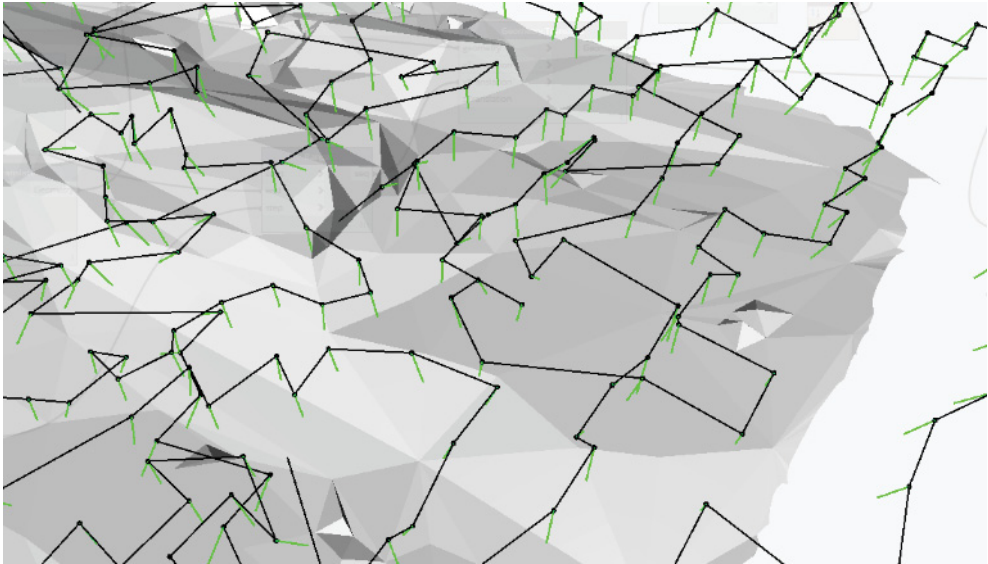


Abb. 5: Darstellung eines Ausschnittes einer energetisch optimierten Trajektorie (schwarz) in komplexer Geländesituation mit Kameraausrichtung (grün)

Zur Beurteilung des Verfahrens müssen neben dem energetischen Verbrauch die Qualität der Ergebnisse betrachtet werden. Für das hier dargestellte Gelände beträgt der prognostizierte Energieverbrauch des UAV bei „TSP-optimierter“ Trajektorie nach dem hier vorgestellten Verfahren $Q = 1306$ mAh. Der prognostizierte Energieverbrauch für die traditionelle Befliegung mit einer ebenen Trajektorie beträgt $Q = 846$ mAh. Diese ebene (traditionell) Trajektorie kann ebenfalls durch einen „TSP-Solver“ optimiert werden und der Energieverbrauch sinkt weiter auf 737 mAh. Der Energieverbrauch alleine rechtfertigt also nicht den Einsatz des hier vorgestellten Verfahrens, da es ca. 54%-77% höhere Verbräuche gegenüber einem traditionellen, ebenen Befliegungszyklus liefert. Insbesondere da häufiges Rüsten bzw. Austausch der Akkumulatoren des UAV durch An- und Abflugwege einen großen Einfluss auf den Gesamtaufwand einer Befliegung hat.

Betrachtet man die Qualität der Ergebnisse und den Energieverbrauch gemeinsam, so ergibt sich ein differenziertes Bild. Vorteile des Verfahrens im Vergleich zu der ebenen Trajektorie liegen in dem konstanten Abstand der AP zum Gelände, welcher bei einer einfachen ebenen Trajektorie nicht gewährleistet ist und zu einer variierenden Auflösung in der erzeugten Punktwolke führt oder führen kann. Weiterhin wird im Vergleich zur traditionellen Vorgehensweise die Ausrichtung der Oberfläche zum UAV ausgewertet und die

Kameraausrichtung entsprechend adjustiert, sodass das die Sensorebene der Kamera weitgehend parallel zum Gelände liegt und damit ein wichtiges Kriterium für ein photogrammetrisches Netzwerk erfüllt ist. Hinsichtlich der Kameraausrichtung sind noch weitere Optimierungen möglich. Zum derzeitigen Entwicklungsstand wird pro aufzunehmendem Bild nur ein Geländepunkt ausgewertet. Es sind bessere Ergebnisse zu erwarten, wenn mehrere Punkte genutzt werden und das Ergebnis nach Flächenanteilen gewichtet wird.

3 Fazit

Qualitative Vergleiche der erzeugten Modelle als Ergebnis realer Befliegungen werden zurzeit erarbeitet, eine Auswertung liegt noch nicht vor.

Abschließend soll die Universalität des vorgestellten Verfahrens nochmals betont werden. Es ermöglicht die Befliegung beliebiger Gelände bzw. komplexer baulicher Anlagen weitgehend automatisch. Im Vergleich zu klassischen Verfahren werden auch vertikale Elemente erfasst und im Regelfall muss der Pilot nicht manuell eingreifen. Weiterhin werden durch den iterativen Prozess Hindernisse weitgehend umflogen.

Literatur

- ACHILLE, C., ADAMI, A., CHIARINI, S., CREMONESI, S., FASSI, F., FREGONESE, L., TAFFURELLI, L. (2015), UAV-Based Photogrammetry and Integrated Technologies for Architectural Applications—Methodological Strategies for the After-Quake Survey of Vertical Structures in Mantua (Italy), *Sensors*, doi:10.3390/s150715520
- AGISOFT LLC (2018), Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4. www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf (15.7.2018)
- ALSADIK, B., GERKE, M., VOSSELMAN, G. (2012), OPTIMAL CAMERA NETWORK DESIGN FOR 3D MODELING OF CULTURAL HERITAGE, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume I-3, 2012.
- DIETRICH, T., KRUG, S. & ZIMMERMANN, A. (2017), An Empirical Study on Generic Multi-copter Energy Consumption Profiles. 11th IEEE Int. Systems Conference (SysCon 2017).
- EISENBEIß, H., (2009) UAV Photogrammetry, Dissertation, ETH Zürich
- FREIMUTH, H. (2015), Generation of Waypoints for UAV-assisted Building Inspection, Masterthesis Ruhr-Universität Bochum
- LINDBERG, T. (2012). Scale invariant feature transform (Vol. 7, p. 10491). <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.10491> (15.7.2018)
- MORGENTHAL, G., HALLERMANN & N., ACHELIK, M. (2015), Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- MORGENTHAL, G. & HALLERMANN (2016), Drone Site Data for Better Decisions in AEC GLOBAL TEAMWORK, Conference Paper, 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering
- WESTOBY, M.J., BRASINGTON, J., GLASSER, N.F., HAMBREY, M.J. & REYNOLDS, J.M. (2012), ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Elsevier. *Geomorphology* 179 (2012). 300–314
- QGROUNDCONTROL (2018). <https://docs.qgroundcontrol.com/en/> (14.7.2018)

Stillstand ist Rückschritt – Digitale Innovationen im Planungsbüro umsetzen

Walter Muck

MUCKINGENIEURE · Innovative Tragwerksplanung · Maria-Ward-Straße 9 · 85051 Ingolstadt ·
E-Mail: ingolstadt@muck-ingenieure.de

MUCKINGENIEURE, gegründet 1996, hat sich von Beginn an der Anwendung innovativer, zukunftsorientierter Technologien in der Tragwerksplanung verschrieben. Die Arbeit mit der Planungsmethode BIM ist ein wichtiger Grund für die hohe Wertschöpfung bei MUCKINGENIEURE. In 20 Jahren hat das Büro einen Weg von B_M über BiM hin zu BIM beschritten und sich kontinuierlich aktuelles Know-how und einen stetig wachsenden Erfahrungsschatz in der Anwendung der BIM-Methode erarbeitet.

1 Die Intelligenz eines Tuschestriches

Erinnern Sie sich noch? Da war doch was – der Tuschestrich. Welche Intelligenz hat ein Tuschestrich? Wer in früheren Jahren noch mit dem Tuschefüller gearbeitet hat, erinnert sich vielleicht noch, was z.B. der blaue Ring am Tuschefüller uns als Information übermittelte „Ich habe die Strichstärke 0.7mm“! Das war es dann aber auch schon. Ob dieser Strich nun eine Schalkante, eine Masslinie oder einen Bewehrungsstab darstellt, ob er Teil einer Bodenplatte oder Decke ist, das verrät uns der Strich nicht.

2 CAD-Einsatz heute

Leider wird heute noch sehr oft, auch die modernste CAD-Software in 2D wie früher ein Zeichenbrett mit Tuschefüller benutzt. Wir wissen jetzt zwar wie lange ein Strich ist, ob er im Winkel oder exakt senkrecht gezeichnet ist, welche Anfangs- und Endkoordinaten er besitzt, mit welcher Strichstärke, Strichart und Linienfarbe er gezeichnet worden ist, dass der Strich z. B. Teil eines Layers der Bodenplatte ist, aber so richtig schlau, so richtig intelligent werden wir dadurch auch nicht. Wohl einziger Vorteil für viele, das Löschen und Wiederherstellen des Striches funktioniert nun auf Knopfdruck, und das beliebig oft, der Einsatz einer Rasierklinge wie früher auf dem Transparentpapier bleibt einem erspart.

3 3D – Building_Modeling – B_M die Basis von BIM

Schon 1997 hat das Büro begonnen Projekte komplett in 3D zu planen. In Bild 1 ist dazu exemplarisch ein Projekt dargestellt. Zu dieser Zeit war jedoch weder die Hardware noch die Software ausreichend leistungsfähig, so dass die 3D-Bearbeitung vorerst wiedereingestellt wurde.

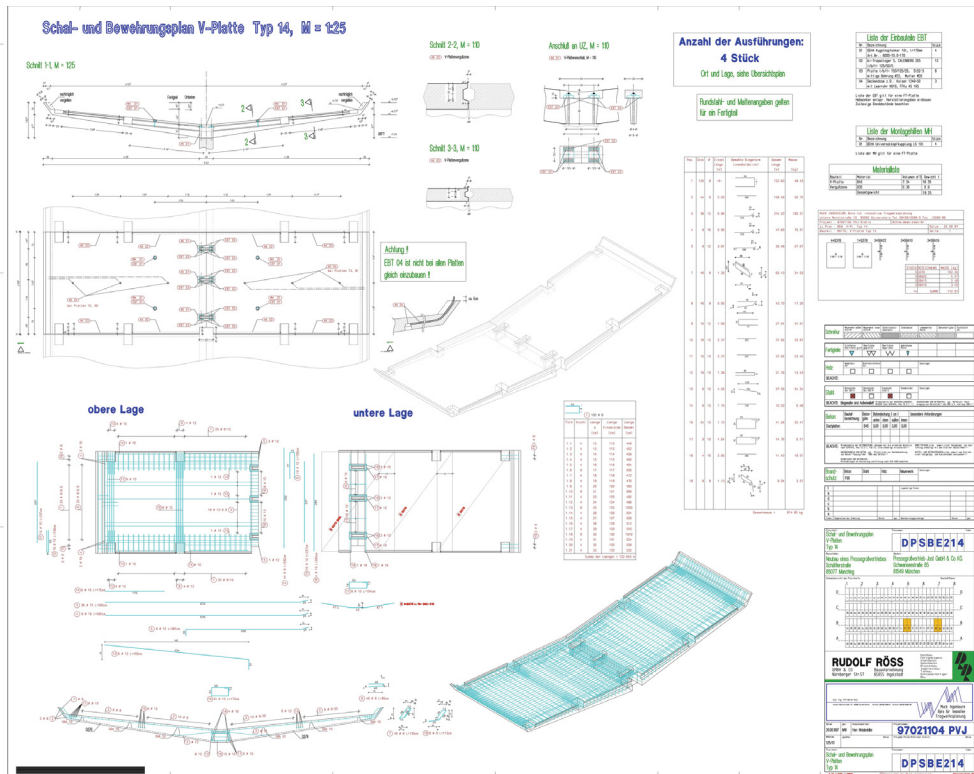


Abb. 1: Elementplan aus 1997 3D-Schalung mit 3D-Bewehrung

Der Grundstein zu zunächst BiM und später dann BIM war 2007 mit der Beauftragung der Planungsleistungen zum Projekt „Neubau eines Verwaltungsgebäudes für EON in Zolling bei Freising“ gelegt. Das Projekt war für **MUCKINGENIEURE** der erneute Startschuss für die 3D-Planung, denn die Geometrie des Gebäudes war äußerst komplex. Um die komplizierte Tragwerkskonstruktion des Gebäudes realisieren zu können, war nicht nur eine intensive Zusammenarbeit zwischen den Planern von **MUCKINGENIEURE** und dem Architekturbüro erforderlich. Die besondere Schwierigkeit lag in der schräg verlaufenden Kontur des Komplexes. Die Wände sind um 26 Grad geneigt, so dass das Gebäude nicht senkrecht nach oben, sondern nach Süden abfallend verläuft. Zudem waren die Büroebenen als Split Level ausgebildet, die Deckenuntersichten gekrümmt. Der Schlüssel zum Erfolg war die Erstellung eines digitalen 3D-Modells, das eine saubere und widerspruchsfreie Darstellung der komplizierten Gebäudegeometrie ermöglichte. Dass auch alle wichtigen Bewehrungsdetails anschaulich räumlich dargestellt werden konnten, hat die Tragwerksplanung erheblich erleichtert (Abb. 2). Seither wird bei uns jedes Projekt, ob groß ob klein, an einem 3D-Modell bearbeitet. Kollisionen können besser kontrolliert und komplizierte Geometrien leichter beurteilt werden.

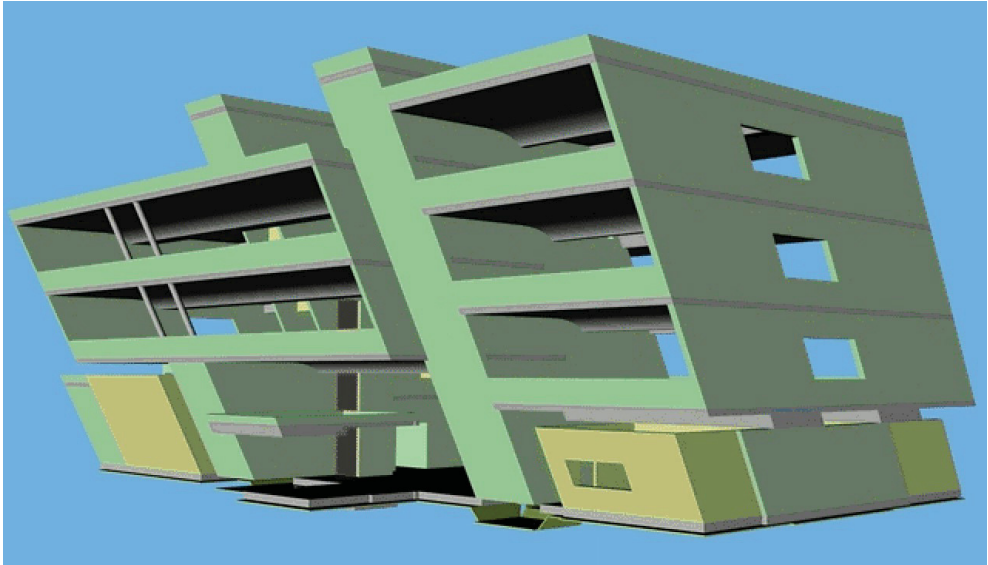


Abb. 2a: 3D-Modell, Verwaltungsgebäude E.ON in Zolling aus 2007

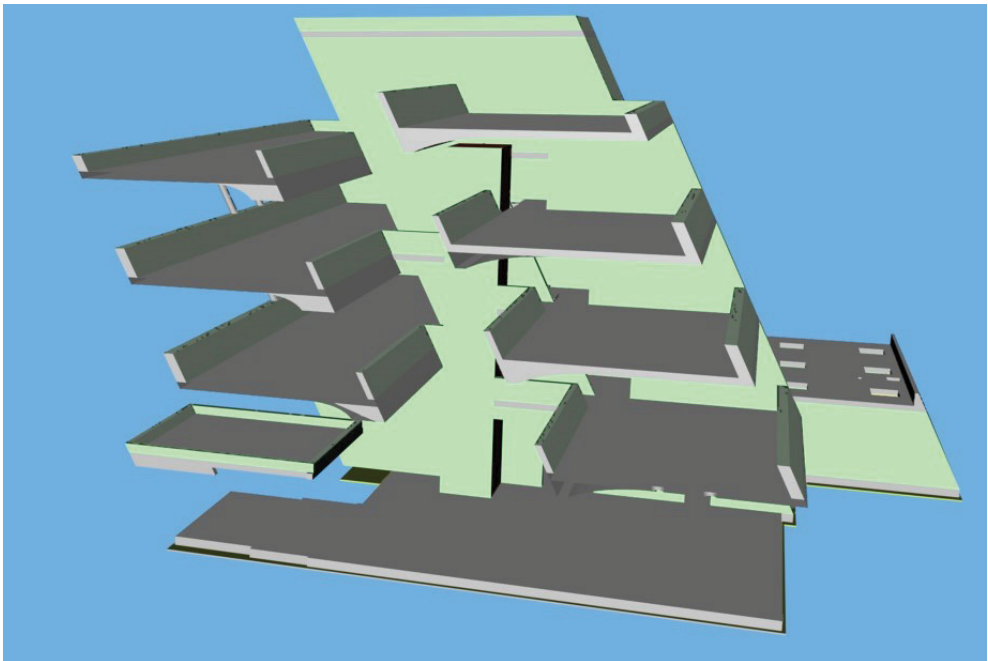


Abb. 2b: 3D-Modell, Verwaltungsgebäude E.ON in Zolling aus 2007

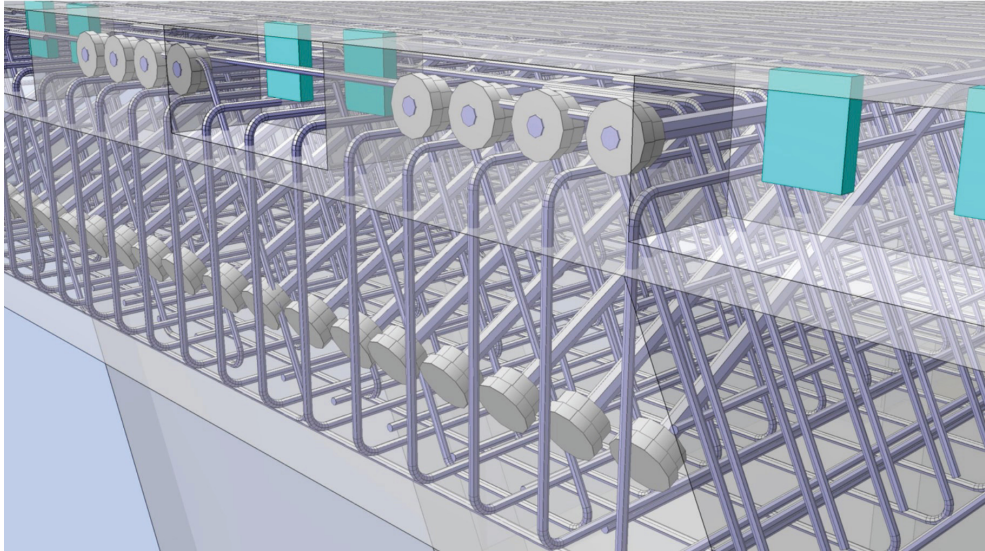


Abb. 2c: 3D-Bewehrung zur Visualisierung für die Baustelle

4 Aus B_M wurde zunächst BiM

Das Team von **MUCKINGENIEURE** setzt bei der Konstruktion von Tragwerken auf Allplan Engineering mit dem Zusatzmodul IBD (Intelligente Bau Daten). Es werden keine Striche mehr gezeichnet, es wird mit intelligenten Bauteilen geplant. Den Bauteilen werden Attribute angefügt. Die Bauteile werden so intelligent. Durch den Einsatz dieser intelligenten Bauteile ist damit gleichzeitig der Bürostandart definiert. Vordefinierte Assistenten erleichtern die Modellerstellung erheblich. Strichart, Strichdicke werden automatisch maßstabsgetreu gewählt, vordefinierte Planlayouts lassen automatisch Schal- und Bewehrungspläne in gewünschter Optik erscheinen. Die Qualität der Ausführungsunterlagen konnte erheblich gesteigert werden. Wir nennen dies BiM, da damit vor allem im eigenen Büro Nutzen daraus gezogen wird. Alles wird assoziativ aus dem Modell dargestellt, d.h. Änderungen etc. werden nur einmal, und zwar am Modell bearbeitet. Das Konstruieren ändert sich nicht. Wir konstruieren sogar oft leichter, da wir konsequent am 3D-Modell bewehren, die Bewehrung also im Schnitt, im Grundriss und in der Ansicht immer da ist. 30-35 % höhere Produktivität in der Konstruktion konnten wir dadurch erreichen (Abb. 3).

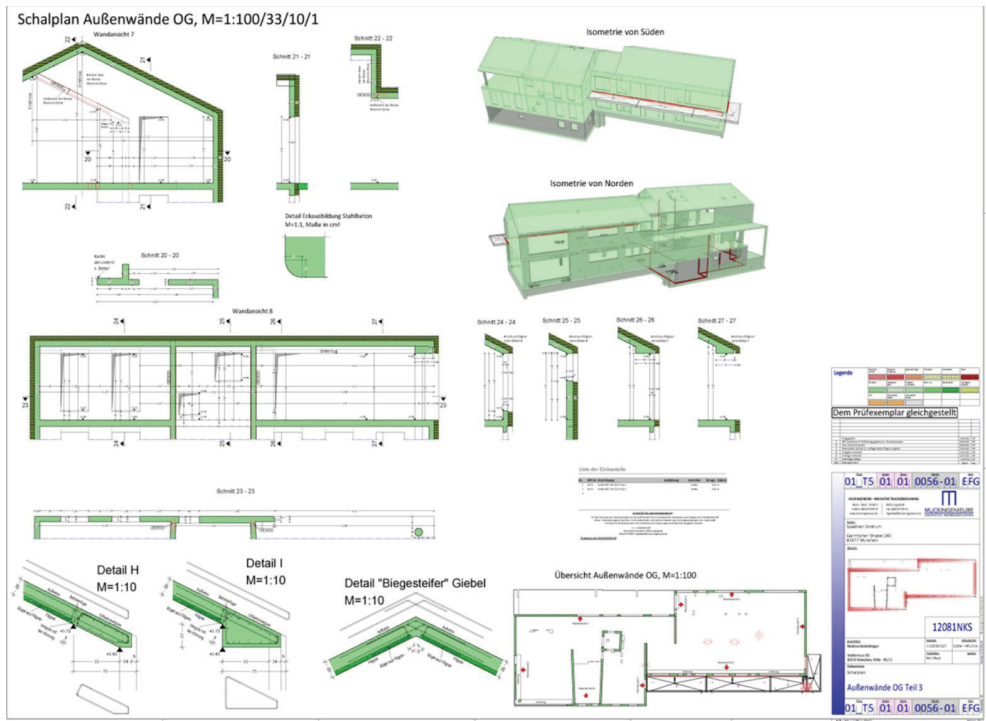


Abb. 3: MUCKINGENIEURE Standard-Schalplan aus dem 3D-Modell mit allen Einbauteilen generiert.

5 Vom BiM zu BIM

Aufgrund der bisher gemachten Erfahrungen war der Schritt vom BiM zum BIM für uns nur noch ein sehr kleiner. Ausgehend von den in der Planungsbibliothek IBD zur Verfügung gestellten Bauteilen und Assistenten ist es uns nun möglich alle Massen aus dem 3D-Modell herauszuziehen.

Weiterverarbeitet mit NEVARIS erstellen wir für unsere Bauherren damit Rohbauleistungsverzeichnisse. Eine Erweiterung unseres Portfolios. Wir haben diese Assistenten bei **MUCKINGENIEURE** so weiterentwickelt, dass wir z. B. jetzt auch Stahlmassenschätzung und Stahlmassenverfolgung direkt aus dem Modell heraus erarbeiten. Die dadurch in diesem Punkt erreichte Effektivitätssteigerung schätzen wir auf 85-90 %. (Abb. 4)



Abb. 5: Bauteilbezogener Aufruf von Ausführungsplänen über die bim+ Plattform

Mit der BIM-Arbeitsweise ergeben sich auch Wettbewerbsvorteile im Hinblick auf Mitarbeiterfindung, Mitarbeiterbindung und Mitarbeitermotivation. Unsere Erfahrung zeigt, dass damit junge Mitarbeiter, die mit Smartphone und Tablet aufgewachsen sind, sehr schnell für diese BIM-Arbeitsweise zu begeistern sind, dass Mitarbeiter generell erkennen, dass Büros, die sich die zukunftsorientierte BIM Arbeitsweise aneignen, zur Sicherung Ihrer Arbeitsplätze einen wichtigen Beitrag leisten, denn die Zukunft ist digital – das ist sicher.

In der Zusammenarbeit der Mitarbeiter untereinander aber auch mit externen Planungspartnern bietet die BIM-Arbeitsweise große Vorteile. Durch das modellbasierte, attributgesteuerte Planen, ist es nicht mehr erforderlich, dass alle Mitarbeiter nur vom Büro aus zusammenarbeiten. Durch online- oder cloudbasierte Softwarelösungen ist es möglich, dass Mitarbeiter von verschiedenen Standorten aus, z.B. auch vom HomeOffice, effektiv an einem Projekt arbeiten können. In einem Zeitalter wo für die Mitarbeiter das Thema Work-Life-Balance immer mehr an Bedeutung gewinnt, ein nicht zu unterschätzender Wettbewerbsvorteil. Ja, selbst verschiedene Büros können so bei Projekten zusammenarbeiten. Eine große Chance auch für kleinere Büros. BIM – ist für **MUCKINGENIEURE** die digitale Revolution im eigenen Planungsbüro und, aber vor allem auch, in der Zusammenarbeit der am Bau Beteiligten“. Wir stehen in Deutschland derzeit noch am Anfang dieser Entwicklung, doch fast täglich entstehen bei **MUCKINGENIEURE** neue Ideen, wie wir unsere Planungsarbeit im Büro und in der Zusammenarbeit mit unserem Planungspartner weiter BIM-basiert optimieren. Die Zukunft ist digital – das ist sicher, und wir bei **MUCKINGENIEURE** wollen mithelfen diesen Weg dorthin so effizient wie möglich zu gehen.

BIM und GIS – Gebäude und Infrastruktur im geografischen Raumbezug

Andreas Carstens

Esri Deutschland GmbH

Nach der BIM-Methodik erstellte digitale Modelle von Gebäuden, Verkehrs- und Versorgungsinfrastrukturen stehen in vielfältiger Beziehung zu ihrer Umgebung. Raum- und Zeit-bezogene Umgebungsdaten sind unverzichtbare Grundlagen für Design, Planung, Bau und Bewirtschaftung im Infrastruktur-Lifecycle. GIS verknüpft Objektmodelle von Gebäuden und Infrastruktur mit Umgebungsdaten

Der Beitrag beschreibt

- BIM und GIS – Verknüpfung von Workflows im Infrastruktur Lebenszyklus
- Integration von 3D-CAD-BIM-Objektmodellen und attributiven Daten in GIS
- BIM-GIS Vorgehensmodell und Anwendungsfälle
- Plattformtechnologie und Softwareentwicklung – Beispiele aus der Kooperation von Autodesk und Esri

Keywords: BIM, GIS, Integration, Vorgehensmodell, BIM-GIS-Softwareentwicklung

1 Einführung

Der BIM-Erlass vom BMVI (2015) zur Einführung der BIM-Methodik bei öffentlichen Großprojekten (ab 2020) ist für die deutsche Bauwirtschaft ein starker Impuls um die Digitalisierung aller Prozesse im Infrastruktur-Lifecycle voran zu treiben.

Der Fokus liegt in der Baubranche derzeit verständlicherweise überwiegend auf der BIM-Thematik (von der Objektplanung bis zu Bauteilkatalogen), weil sich die zukünftigen Vorgaben sehr weitgehend auf Design-, Planungs-, Bau-, Betriebs- und Modernisierungsphasen von Infrastrukturprojekten auswirken.

Es müssen Ausbildungsinhalte neu definiert werden (z. B. Arbeitskreis Bauinformatik 2015) und es ergeben sich zahlreiche Aufgaben im Bereich von Austauschformaten (IFC; BCF), inhaltlicher Beschreibung (3D, 4D, 5D, 6D, 7D) und der Standardisierung (buildingSMART e.V.).

Doch Gebäude und Infrastruktur stehen in allen Phasen ihres Lebenszyklus in enger Wechselwirkung mit ihrer Umgebung. Die Digitalisierung fördert durch die Möglichkeiten durchgängige Workflows zu etablieren und durch stärkere Vernetzung auf Plattformen für die effiziente Zusammenarbeit der Beteiligten die ganzheitliche Sicht auf den Objekt-, Raum- und Zeitbezug im Lebenszyklus.

Als Instrumentarium dafür dienen die BIM- und GIS Autorensysteme, die bereits seit langem in etablierten Verfahren für die einschlägigen Aufgaben eingesetzt werden.

Neu an den Impulsen durch die Digitalisierung sind für BIM und GIS vor allem die Verwendung digitaler Zwillinge sowohl der Objektmodelle als auch der Umgebungsdaten, die viel stärkere Vernetzung, die Einbeziehung von Sensoren (IoT) und nicht zuletzt die wechselseitige Integration von Informationen aus den Autorensystemen. Ziel sind gemeinsame Ergebnisse auf digitaler Basis, die alle Zyklusphasen betreffen.

2 Bauinformatik und Infrastruktur-Lebenszyklus

Digitale Objektmodelle der baulichen Infrastruktur (Gebäude, Straße, Schiene, Wasserstraße, Flughäfen etc.) sind Ergebnis und Gegenstand der Bauinformatik mittels digitaler Bauwerksplanung und im weiteren Verlauf der Bauausführung und des Gebäudemanagements bzw. des Betriebs.

Idealerweise wird vom Baubeginn an das Objektmodell als digitaler Zwilling (digital twin) geführt, der über alle 5 Phasen des Infrastruktur-Lebenszyklus (Infrastructure Lifecycle, ILC) aktuell gehalten wird.

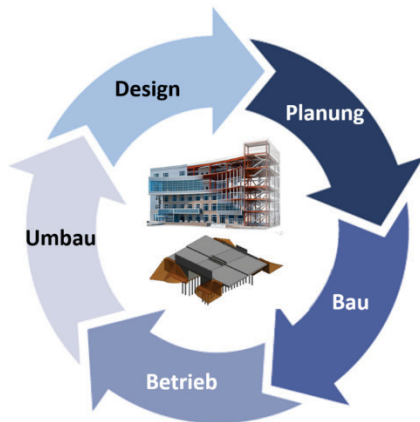


Abb. 1:
Infrastruktur Lebenszyklus (verändert
nach BORRMANN et al., 2015)

Durch die Digitalisierung und BIM-Einführung steht das Objektmodell selbst besonders im Vordergrund, wirkt sich jedoch ebenso auf die digitalen Betriebsabläufe des ILC aus.

Sowohl unter dem Aspekt des Standortes (Bautechnik; Umgebung) als auch unter dem Aspekt des Prozessmanagements im ILC stellt sich die Frage nach dem räumlichen Bezug eines Bauwerks in seiner Umgebung.

3 Geografisches Informationssystem und Integration von BIM-Objektmodellen

Im Geografischen Informationssystem (GIS, Abb. 2) wird das digitale (3D-) Objektmodell mit dem digitalen Umgebungsdatenbestand verknüpft. Damit lassen sich sowohl Standort-

fragen (z.B. Georeferenzierung) als auch funktionale Wechselwirkungen und Zusammenhänge herstellen, analysieren und bearbeiten.

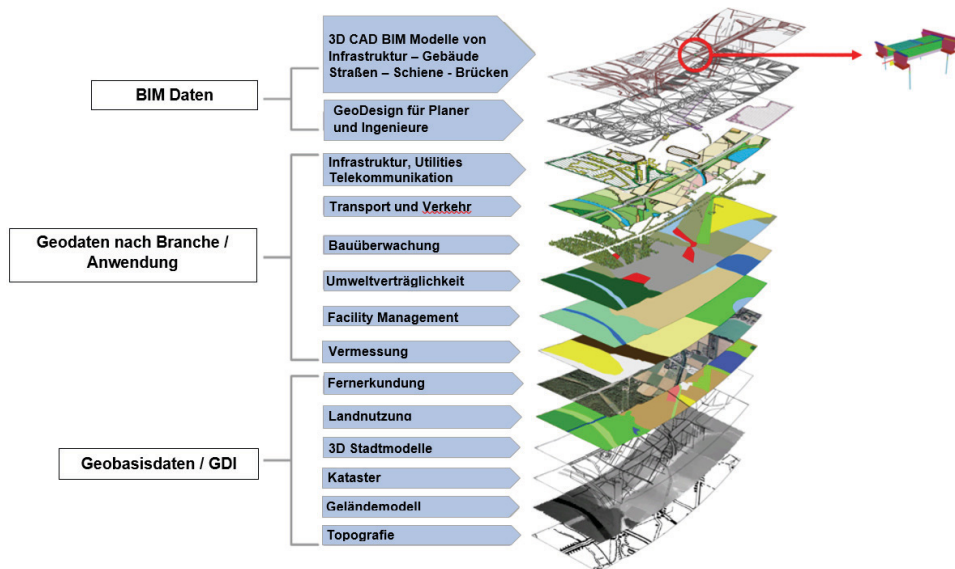


Abb. 2: GIS-System und integriertes BIM Objektmodell

Technisch gibt es mehrere Möglichkeiten, BIM-Objektmodelle ganz oder in Auszügen in ein GIS zu integrieren (Abb. 3). Gebräuchlich ist die Bereitstellung von Objektmodellen durch BIM-Autorensysteme im IFC-Format und die darauffolgende Integration in das GIS. Dieser Prozess kann bzgl. Datenübernahme aber auch gewisse Nachteile haben. Eine weitere Möglichkeit ist die direkte Übernahme von BIM Objektmodellen in ein GIS, z. B. von Revit-Daten in ArcGIS Pro; Details dazu siehe unter Punkt 7.

INTEGRATION VON 3D CAD-BIM OBJEKTMODELLEN IN ARCGIS

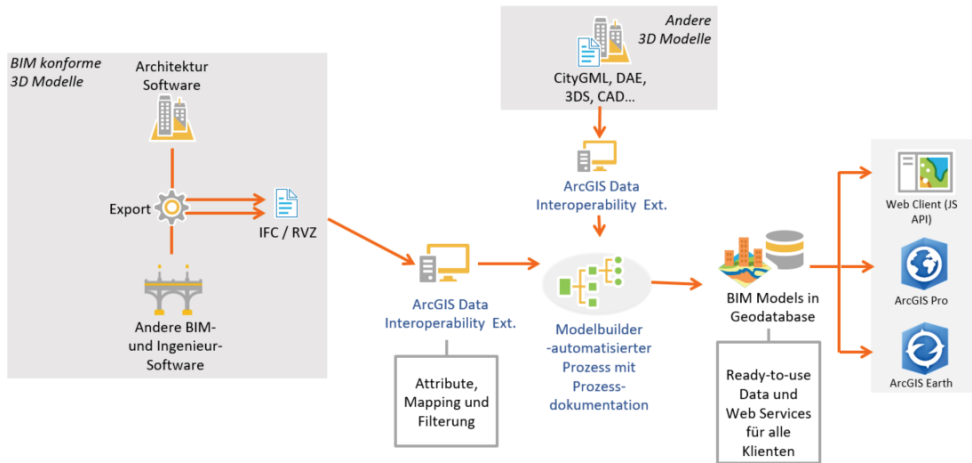


Abb. 3: Integration von BIM-Objektmodellen in ArcGIS

4 BIM und GIS – Interaktion der Autorensysteme

Die Anforderung zur verbesserten Kooperation unter den Projektbeteiligten betrifft nicht nur die objektbezogenen BIM-Prozesse, sondern ebenso die Beziehung des Objektmodells im digitalen Raumbezug.

Mit dem digitalen BIM-Modell (digitaler Zwilling) aus BIM Autorensystemen korrelieren die digitalen Umgebungsdaten aus GIS-Systemen (Integration über IFC oder direkt). Das BIM-Objektmodell beansprucht den geografischen Umgebungsdatenraum.

Die digitale Umgebung enthält die Einflussgrößen, die sich auf das Infrastrukturmodell auswirken. Umgekehrt sind Auswirkungen des Infrastrukturmodells auf die Umgebung ebenfalls erst im Umgebungsdatenraum zu ermitteln. Neben dem räumlichen Bezug der GIS-Daten wird auch ihre zeitdynamische Veränderung im Projektzyklus dargestellt („4D“).

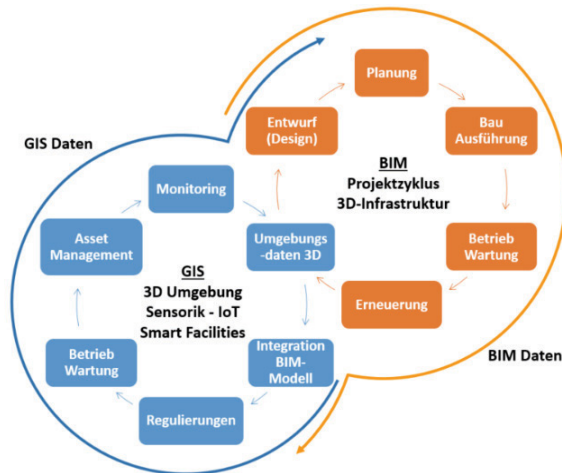


Abb. 4:
Interaktion von BIM und GIS

5 GIS Workflows im Infrastruktur-Lebenszyklus

Aus den BIM-GIS Kooperationsergebnissen lassen sich sowohl die Gestaltung der Umgebung als auch Auswirkungen des Objektmodells selbst ableiten. Die Bearbeitung erfolgt jeweils in den Autorensystemen BIM und GIS.

GIS-WORKFLOWS IM INFRASTRUKTUR LEBENSZYKLUS

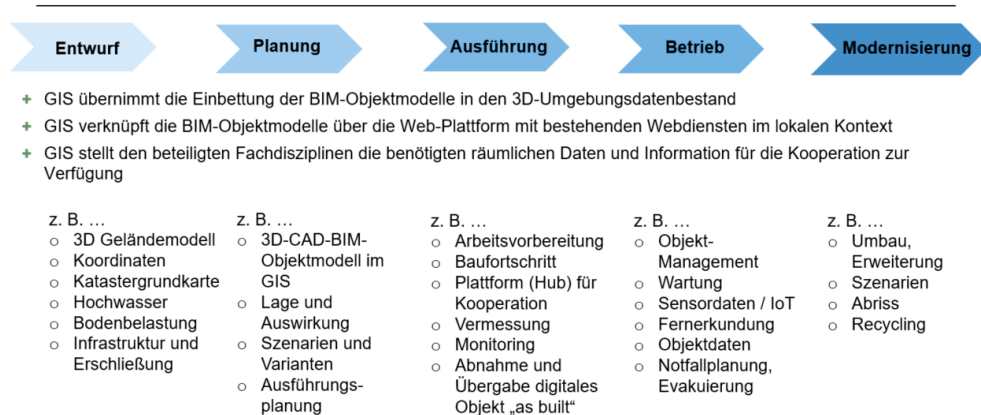


Abb. 5: GIS Workflows in den 5 Phasen des ILC

6 BIM-GIS Vorgehensmodell

Ein wesentliches Ziel der Digitalisierung in der Baubranche ist die Gestaltung möglichst durchgängiger Workflows.

An die im GIS integrierten BIM-Modelle setzen sowohl GIS-Arbeitsabläufe an, die direkt im Bezug zum BIM-Objektmodell stehen, als auch solche, die Betriebsabläufen bei Planung, Bau und Betrieb betreffen.

Bezogen auf Objektmodelle lassen sich vorrangige BIM-Anforderungen bzw. Aufgaben nennen, die in den einzelnen Phasen des ILC im Verbund mit den Umgebungsdaten zu lösen sind. In diesem Kooperationsbereich treffen BIM und GIS aufeinander.

Aufgrund der hohen Komplexität der BIM-GIS Verknüpfung ist ein systematischer Ansatz erforderlich.

Mit dem BIM-GIS Vorgehensmodell lassen sich BIM-Aufgaben mit den dazugehörigen GIS-Aufgaben korrelieren, d.h. erforderliche Daten und Funktionalität aus beiden Bereichen zusammenführen und die Ziele für das Kooperationsergebnis definieren.

Mit dem BIM-GIS Vorgehensmodell lassen sich für die BIM-Anwendungsfälle (rechts) die spezifischen Aufgaben für das BIM-Objektmodell im Kontext mit den Umgebungsdaten beschreiben, damit auf der GIS-Ebene (links) die erforderlichen Geodaten und GIS-Funktionen (Programme, Apps, Fachanwendungen) ausgewählt werden.

Die im Vorgehensmodell genannten Anwendungsfälle sind softwaretechnisch hinterlegt, d.h. für die Kooperationsergebnisse steht das nötige Software-instrumentarium zur Verfügung.

Je nach Fragestellung resultieren BIM-GIS Kooperationsergebnisse (Mitte) die über alle Phasen des Projektzyklus reichen und nicht nur in der Phase Planung oder Bau auftreten.

Beispielhaft sind solche Zusammenhänge in Abb. 6 und 7 als Anwendungsfälle genannt. Zu Beginn sind Übereinkünfte erforderlich zu Datengrundlagen (geografischer Raum, Zeit, Datenbezug („single source of truth“) oder Integration des BIM-Modells in den GIS-Datenbestand (Umfang) (s. Abb. 3).

BIM UND GIS – AUSGANGSDATEN UND INTEGRATION

GIS Anwendung im BIM-Kontext	Verwendung der Geodaten (Kontext) Desktop / mobil	BIM-GIS Kooperationsergebnis		Verwendung von BIM-Daten in Desktop oder mobil	BIM Anwendungsfälle
Geodatenbank als eindeutige Datengrundlage (single source of truth) BIM Objektmodell wird integriert, Änderungen des Modells nur im BIM-Autorensystem	gemeinsame Festlegung zum Planungsdatenbestand Dynamik der Geodaten	- Aktuelle Daten für Design, Planung, Bau, Betrieb und Erneuerung - Szenarien bei Änderungen - Varianten	- Aktuelle Umgebungsdaten - Planungsfehler vermeiden	Planungsbezug zum aktuellen Umgebungsdatenbestand	Eindeutige gemeinsame Datengrundlage BIM Modell (single point / single source of truth)
BIM Modell integriert in ArcGIS (IFC; Revit) 3D Geodatenbestand als digitaler Kontext für das BIM Objektmodell Bereitstellung als Web Service für Projektbeteiligte (Kollaboration)	Anpassungen der Projektverantwortlichen in Geodaten (nach Phase Design, Planung, Bau, Betrieb und Umbau / Erneuerung)	- Auswirkung BIM-Modell auf Umgebung - Ergebnisse Geo-Analyse - Änderungen im GIS Autorensystem	- Abgestimmte und dokumentierte Ergebnisse am BIM-Modell - Änderungen im BIM-Autorensystem	Besprechungen und Anpassungen der Projektverantwortlichen am BIM Modell (nach Phase Design, Planung, Bau, Betrieb und Umbau / Erneuerung)	Abstimmung zu Kollaboration BIM-Modell integriert im Umgebungsdatenbestand

Abb. 6: BIM-GIS Vorgehensmodell - Ausgangsdaten und Integration

Auf diesen Grundlagen folgen je nach Anforderung bzw. Spezifikation BIM-GIS Workflows wie z. B. mobiler Datenzugriff, virtuelle Bauwerksbegehung, Kollisionsermittlung, und andere (Abb. 7)

BIM UND GIS – MOBILE DATEN, VIRTUELLES MODELL, KOLLISIONSPRÜFUNG

GIS Anwendung im BIM-Kontext	Verwendung der Geodaten (Kontext) Desktop / mobil	BIM-GIS Kooperationsergebnis		Verwendung von BIM-Daten in Desktop oder mobil	BIM Anwendungsfälle
Mobiler Visualisierung von Geodaten mit der Bau Infrastruktur Nutzung von Webservices von Umgebungsdaten	Aktualisierung von Geobasis- und Geo-Fachdaten inkl. UAV für Planung, Bau und Betrieb	- Dokumentation der Ergebnisse am Standort - Auswirkungen (Planungsort, Baustelle, Betriebsort)	- Aktuelle Entscheidungsgrundlage am Standort / Baustelle - Fehlervermeidung	Mobil auf aktuelle und vollständige Informationen zugreifen	Mobiler Zugang zu Dokumenten und Plänen
Digitales Umgebungsdatenmodell Verwendung von VR und AR	Prüfung auf Änderungen im Ausgangsdatenbestand	- Ergebnis der Bauwerksbesichtigung (z.B. Streckenbauwerke Straßen, Gewässer)	- Abgleich auf der Baustelle	Digitales Gebäudemodell begehen, Sichten, Details	Virtuelle Bauwerksbesichtigung (VR, AR)
Leitungs-, Verkehrs- und Nutzungs-Infrastruktur (Utilities)	Kollisionsermittlung im Umgebungsdatenbestand Änderungen relevanter Utility-Daten	- Kollisionsfreie Korridore und Flächen - Varianten	- Aktualisierung mit Umgebungsdaten	Kollisionsprüfung im BIM Datenbestand	Kollisionsermittlung

Abb. 7: BIM-GIS Vorgehensmodell - Mobile Daten - Virtuelles Modell - Kollisionsprüfung

Beispiele von Kooperationsergebnissen sind in den Abb. 8 bis 10 dargestellt.

INTEGRATION BIM OBJEKTMODELL IN ARCGIS

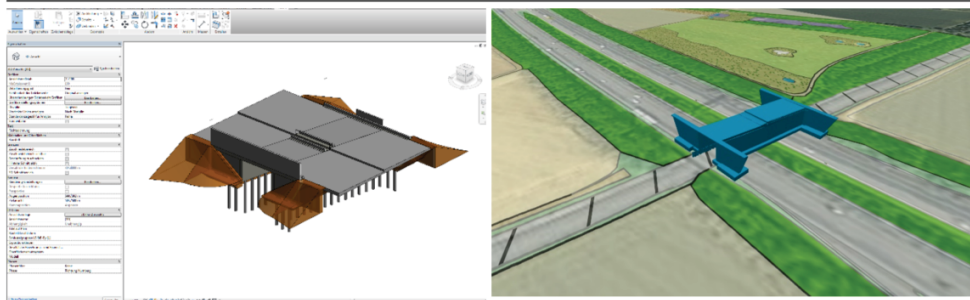


Abb. 8: Integration BIM Objektmodell A 99 aus AutoCAD (IFC-Format) in ArcGIS (SCHALLER, 2015)

BIM BAUWERKSMODELLE MIT ATTRIBUTIVEN DATEN IM GIS

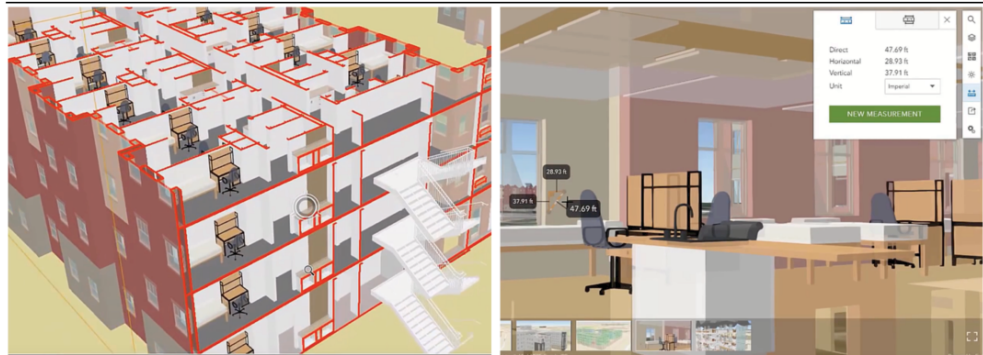


Abb. 9: Integration BIM Objektmodell Gebäude aus Autodesk Revit in ArcGIS Pro 2.2 (Esri 2018)

KOLLISIONSPRÜFUNG

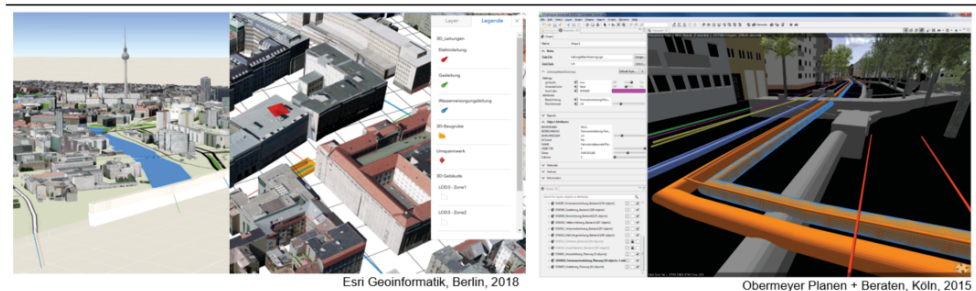


Abb. 10: BIM-GIS Kollisionsprüfung – Beispiel aus Berlin und Köln

7 BIM und GIS – Plattformtechnologie und Software eröffnen neue Gestaltungsräume

Digitale Integration und BIM-GIS-Prozesse setzen entsprechende Technologie und Software als Instrumentarium voraus.

Autodesk Corp. und Esri Inc. haben die Veränderung von Arbeitsabläufen und die zukünftige Entwicklung der Digitalisierung von BIM und GIS frühzeitig erkannt und ihre strategische Kooperation darauf ausgerichtet (Nov. 2017). Das gilt sowohl für die Plattformtechnologie zur Förderung der Zusammenarbeit der Beteiligten als auch für die engere Verknüpfung funktionaler Software zum Aufbau durchgängiger und effizienter Workflows.

In der kurzen Zeit seit Beginn der Kooperation wurden dafür wichtige Meilensteine der BIM- und GIS-Softwareentwicklung erreicht. Die Beschreibung einsetzbarer Funktionen, Apps und Programme wäre an dieser Stelle zu umfangreich, daher sind hier stellvertretend einige Beispiele genannt.

- Neu entwickelter InfraWorks ArcGIS Connector (online); Autodesk Connector for ArcGIS; Video mit Praxisbeispiel ab Min 31:35-47:00 - Video InfraWorks ArcGIS online connection (24.8.2018); Video kurz <https://www.youtube.com/watch?v=wnLSaa-V2ok>
- Neu entwickelte direkte Übernahme von AUTOCAD Revit-Modellen (BIM) durch ArcGIS Pro 2.2 <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/revit/adding-revit-data-to-arcgis-pro.htm>; <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/revit/about-georeferencing-revit-or-cad-data.htm>; u.a. (24.8.2018)
- Update von ArcGIS for AutoCAD New release ArcGIS for AutoCAD (24.8.2018)

Durch die technologische Erschließung der Interaktion von BIM und GIS bietet sich sowohl den BIM- als auch den GIS-Autoren eine Fülle neuer Gestaltungsmöglichkeiten – vom einzelnen Infrastrukturobjekt bis zu Smart Cities, vom reinen BIM-Kontext bis zu den Betriebsabläufen bei Planung, Bau und Betrieb im Infrastruktur-Lifecycle.

Literatur

- BMVI (Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2015), Building Information Modeling (BIM) wird bis 2020 stufenweise eingeführt. BMVI Pressemitteilung 152/2015 <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2015/152-dobrindt-stufenplan-bim.html> (24.8.2018)
- Borrmann, A., König, M., Koch, Chr., Beetz, J. (2015), Building Information Modelling
- Schaller, J. (2016), BIM und GIS Integration – BAB Ausbauprojekt <http://www.psu-schaller.de/index.php?ip=263> (24.8.2018)

Features of BIM modeling of engineering systems of the construction object

Pavel Anatol'evich Brazhnikov¹ and Pavel Dmitrievich Chelyshkov²

Automation and Power Supply · Moscow State University of Civil Engineering
Yaroslavskoye highway 26 · 129337 Moscow

¹E-Mail: brazhnikovpa@mgsu.ru

²E-Mail: chelyshkovpd@mgsu.ru

In this article, the possibilities of designing engineering systems of buildings with the use of information modeling tools are considered. In particular, the aspects of the process of designing power supply systems are discussed in detail. The analysis of software products on their adaptability to design problems and the regulatory framework of the Russian Federation is analyzed using the example of calculating the required illumination level for various types of premises (lighting engineering calculation).

The article considers two BIM-oriented programs performing the same process. In the course of the analysis, different approaches to accomplishing the task. In particular, similar program features were revealed, as well as their differences, which allow design engineers to develop project documentation with varying degrees of detail.

Keywords: Information modeling, Indicator of illumination, Normative and technical documentation, Format of data exchange, The life cycle

1 BIM modeling

1.1 Concepts

The application of information modeling technologies (BIM) in the problems of engineering and construction design allows to reduce the time and improve the quality of making design decisions, and also to create decision support tools for the tasks of the whole life cycle of the construction object.

With the development of systems of information modeling of buildings and structures, the problem of designing engineering systems can be realized with the involvement of less human and time resources. The process of information modeling allows not only to save time for the development of output documentation, but also to minimize the influence of the human factor on the quality of design solutions.

1.2 Existing solutions to interaction

Currently, there is a fairly large number of software tools that implement information modeling technologies that allow the development of project documentation for electrical equipment and lighting in the Russian Federation, in accordance with Government Decision No. 87 "On the composition of sections of project documentation". Next, the functionality of these software products allows you to export the developed model into an open data

exchange format (supported by the vast majority of software environments) IFC to simplify the interaction between various software tools and to form a common data environment between the stages of the life cycle of the construction site.

2 Adaptation of BIM modeling programs to the design of engineering systems in the Russian Federation

2.1 Problem

BIM modeling programs need adaptation to design features in the Russian Federation, especially in engineering systems. This is justified by the various requirements for the implementation of the main sections of the design and working documentation required for the design of engineering systems projects, in particular power supply and electric lighting systems. It is also worth noting different approaches to designing similar sections in different countries. To identify the difference, several programs were compared to perform a work task.

2.2 Approbation

As an example, consider the implementation of the problem of calculating the level of illumination in a room (lighting engineering calculation) in two software products that implement simulation technologies in engineering and construction design.

Consider the same room in two different programs of information modeling, one of which is the development of domestic specialists, created under the import substitution program. Since the designing will take place on the territory of the Russia, it is necessary to apply the standards of illumination established in the higher normative and technical documents accepted in Russia. Such are the List of the Rules 52.13330.2016 «Daylighting and artificial lightning» and Health Regulations Standarts 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Hygienic requirements for natural, artificial and combined lighting of residential and public buildings».

Consider the usual office in the office building, for 2-4 employees.

According to table №2 of the Health Regulations Standarts 2.2.1/2.1.1.1278-03 this room belongs to the administrative buildings and has a height of the working plane (surface) G-0.8. This means that the visual work is carried out on a horizontal plane, at a distance of 0.8 m from the floor (the standard height of the desktop). In addition, the illumination index on this surface should be 300 lux. Taking these data as standard for the room, we calculate the level of illumination in this room, using the same model of luminaires in two different BIM-oriented programs.

The first type of software used automatically calculates the illumination level using the lighting equipment utilization factor. This software is developed under the import substitution program and has a significant database of normative and technical documents integrated into the program environment, which ensures maximum compliance of project solutions with normative documentation.

Figure 1 shows the process of automatic selection of fixtures of a certain type and the calculation of the illumination level according to pre-selected types of rooms by Health Regulations Standards 2.2.1/2.1.1.1278-03.

Parameters:

- Разряд зрительный работ: 51
- Нормируемая освещенность, лк: 300
- Рекомендуемый источник света: ЛП
- Высота рабочей поверхности, мм: 800
- Характеристики среды:**
 - Категория помещения по НПБ 105-03: Д
 - Категория взрывоопасной зоны по ПУ: Не взрывоопасная
 - Категория пожароопасной зоны по ПУ: Непожароопасная
 - Среда: Нормальная
 - Температура, °C: 20
- Светоотражающие коэффициенты:**
 - Коэффициент отражения потолка рпот.: 0.7
 - Коэффициент отражения стен рст. о.в.: 0.5
 - Коэффициент отражения пола рпол. о.в.: 0.3
 - Коэффициент запаса Ко. о.в.: 1.4
 - Максимальная неравномерность осв.: 1.15
- Расчет освещенности. Метод Ки:**
 - Высота установки светильников, мм: 3430
 - Расчет по: по светильнику
 - Светильник: PPS/S 4x18 HF накладной призм. с ЭПРА
 - Шаг сетки расстановки светильников: 600
 - Вычисленное количество светильников: 0
 - Установленное количество светильников: 0
 - Нормируемая освещенность, лк: 300
 - Вычисленная освещенность, лк: 0

Вычисленное количество светильников, шт.:

Table of Results:

Светильник	Тип ламп	Количество ламп	Необходимое количество светильников	Освещенность от необходимого количества светильников	Рекомендуемое количество светильников	Освещенность от рекомендованного количества светильников	Индекс помещения	Ки
PPS/S 4x18 HF накладн...	СД	4	7	343.23	8	392.31	0.03	29.65

Buttons: Пересчитать, Поместить, Закрыть

Fig. 1: Selection of parameters and luminaires for automatic calculation of the level of illumination in the room (Software №1).

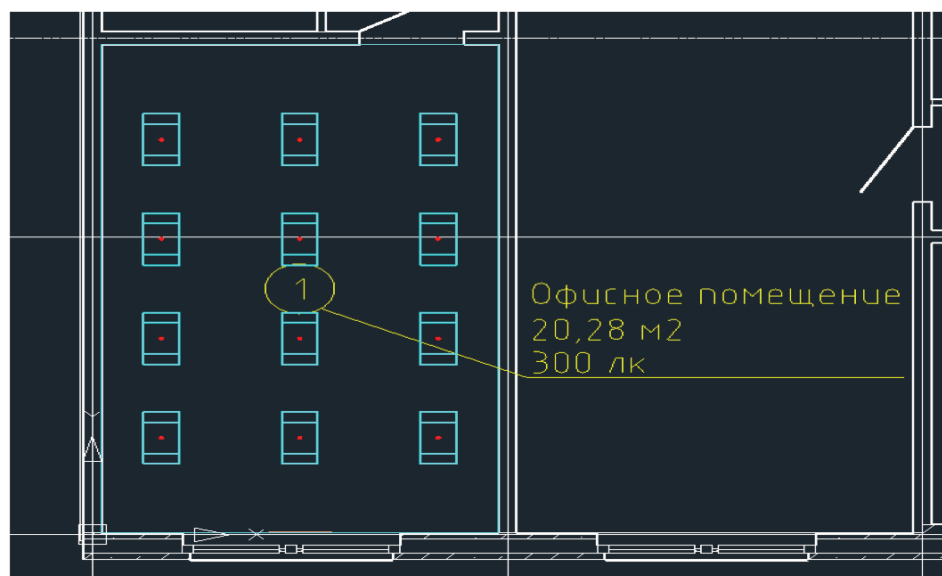


Fig. 2: Presentation of the results of automatic calculation and selection of fixtures (Software №1).

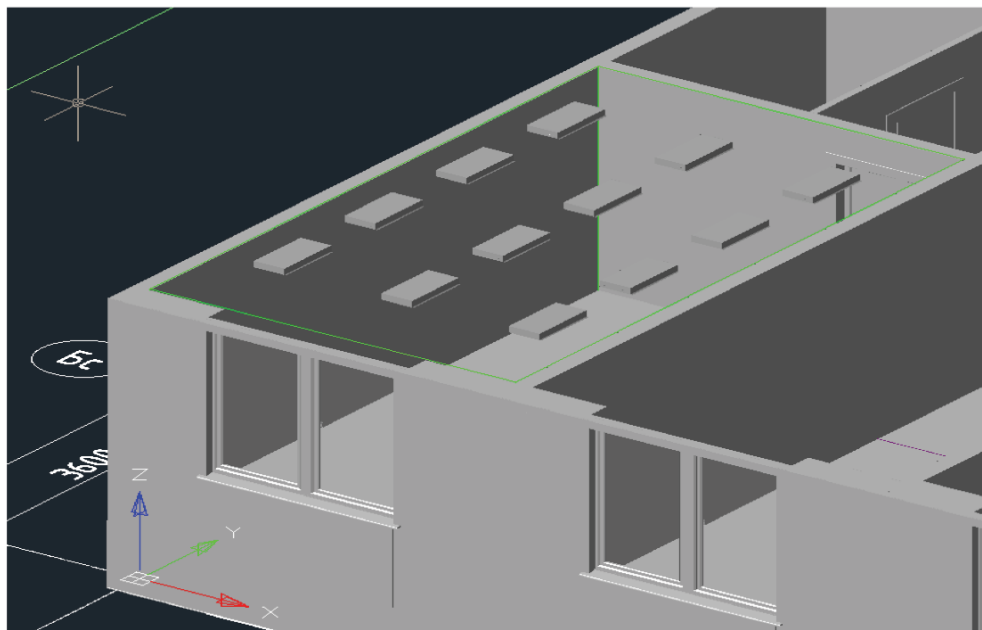


Fig. 3: Representation of the 3D model of the object (Software №1).

The study of the process of automatic calculation of illumination software # 1, we can conclude that the calculation itself is correct and its presentation to the project. It is worth noting that due to integrated normative-technical documents and their parameterization, the calculation is simplified to the utmost, but still meets the required parameters.

The second type of program also performs automatic calculation of the level of illumination, however, the automatic arrangement of objects in the model space is absent.

Normative and technical documents used in the design in the RF in this program are not integrated, therefore it is not possible to choose the type of the premises according to the document, and however, the illumination level calculation by the coefficient of utilization is realized here. It is worth noting that the program calculates the lighting is not entirely correct (the maximum illumination is indicated).

The positive aspects of the first approach include adaptation to the normative and technical documents of the Russian Federation, because of their integration into the program complex. Including, there is an automatic calculation and arrangement of the lighting elements, according to the required illumination. The disadvantages are weak visualization and the old-fashioned 2D approach to compiling the information model.

To the positive sides of the second approach is a high level of detail, as well as flexible adjustment of the elements of electric lighting. In this case, the disadvantages are the impossibility of automatic arrangement of the elements, according to the level of illumination, an incorrect calculation of the illumination index (in terms of maximum illumination).

Figure 4 shows the automatic calculation of the illumination level on the plan, indicating the peak level of illumination in the selected room.

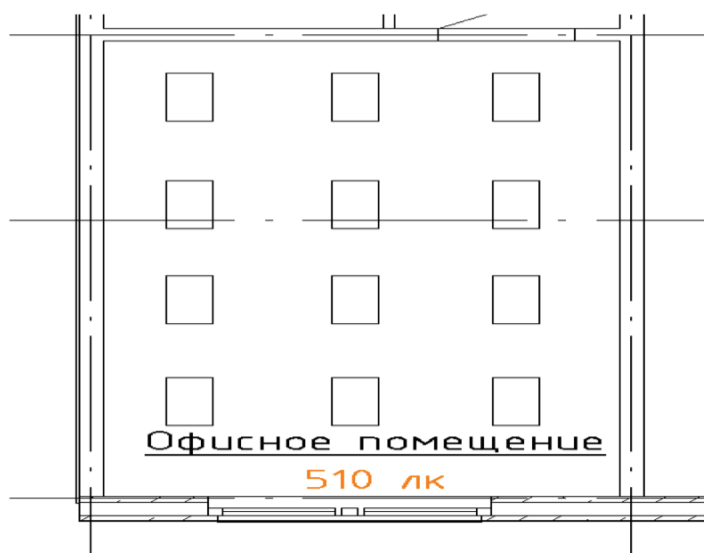


Fig. 4: The location of equipment and the level of illumination, calculated in automatic mode (Software №2).

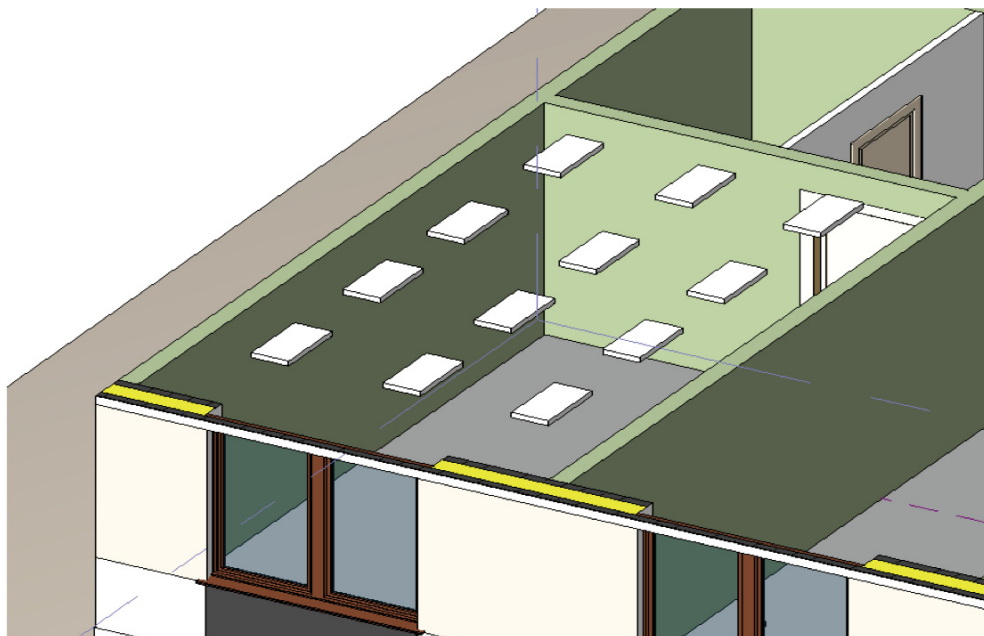


Fig. 5: Representation of the 3D model of the object (Software №2).

Thus, practical tests have been carried out on the application of two types of software products for solving the problems of engineering and construction design using information modeling technologies. It is possible to single out such common approaches of the considered software products as the automated calculation of the illumination level based on the lighting files (IES) from the manufacturer. At the same time, the considered software has significant differences: different methods for calculating the level of illumination, different approaches to the organization of data libraries for electric lighting elements. The use of various software tools to solve almost project problems is conditioned by the formulation of the design task and the structure of the initial data. A promising area of work in the subject area under consideration is the development of a methodology for selecting software tools for implementing project procedures, based on known limitations and formulated optimality criteria.

References

- VOLKOV, A.A. (2017), The problem of complex estimation of parameters in distributed network monitoring systems of construction objects. In X All-Russia multi-conference on management issues: materials MKPU–2017. In: 3 t. Rostov-on-Don; Taganrog, 3, 43-45.
- VOLKOV, A., SEDOV, A., CHELYSHKOV, P., PAVLOV, A. & KIEVSKIY, L. (2016), Promising energy and ecological modeling in computer-aided design. In: International Journal of Applied Engineering Research. 11, 1645–1648.
- VOLKOV, A.A. & LEBEDEV, V.M. (2017), Formation of functional systems and intellect of buildings. In: Newsletter BGTU – 2017. 1, 116-119.
- VOLKOV, A. & SHILOVA, L. (2016), Some criteria of critical infrastructures stability. In: MATEC Web Conf. / 5th International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education”, 86 (IPICSE–2016) 05009. Doi:10.1051/mateconf/20168605009.
- GINSBURG, A.V. (2016), Information model of the life cycle of a construction. In: Industrial and civil construction, 9, 61-65.
- GINSBURG, A.V. (2016), BIM-technologies during the life cycle of the construction site. In: Information resources of Russia, 5, 28-31.
- GINSBURG, A.V., SHILOVA L.A. & SHILOV L.A. (2017), Modern standards of information modeling in construction. In: Scientific Review, 9, 16-20.
- HEALTH REGULATIONS STANDARDS 2.2.1/2.1.1.1278-03 Hygienic requirements for natural, artificial and combined lighting of residential and public buildings. tabel. 2.
- LIST OF THE RULES 52.13330.2016 Daylightning and artificial lightning. table 4.1,4.2.

Session 1:

Simulation und Modellierung 1

Building Information Modeling

Early- und Late-Adopter

Thomas Behnke

Professur Intelligentes Technisches Design · Bauhaus-Universität Weimar

Marienstraße 13a · 99423 Weimar

E-Mail: thomas.behnke@uni-weimar.de

Der Beitrag untersucht die Innovationsbereitschaft von Early- und Late-Adoptern bei der Einführung von Building Information Modeling (BIM). Dabei werden unter entwerflichen, organisatorischen, rechtlichen und technischen Gesichtspunkten verschiedene Positionen gegenübergestellt und Wege für einen notwendigen kooperativen Planungsansatz zwischen Early- und Late-Adoptern aufgezeigt. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass etwa die Hälfte der am Bau Beteiligten aus marktwirtschaftlichen Mechanismen heraus die BIM-Methode übernehmen wird. Die andere Hälfte benötigt darüber hinaus einen Gesetzesrahmen für die Anwendung einer kooperativen Planungsmethode und einen Entscheidungsdruck von außen durch behördliche Instanzen oder andere Marktteilnehmer. Die BIM-Methode erfordert einen kooperativen Planungsansatz, der alle am Bau Beteiligten einschließt, da ansonsten die kleinteilige Unternehmensstruktur der deutschen Bauwirtschaft diesem Ansatz die Grundlage entzieht.

Keywords: BIM, Bauwirtschaft, Adoptionstheorie, Kooperation

1 Einleitung

Building Information Modeling (BIM) ist eine Methode zur Verbesserung von Planungs- und Bauprozessen. Die Methode stellt einen Paradigmenwechsel von einer linearen, disziplinar strukturierten zu einer modellbasierten, interdisziplinären Planung dar, wodurch die bisher klar zugeschriebenen Verantwortlichkeiten innerhalb einer HOAI-Leistungsphase für kontinuierlichere Bauprojekterfolge aufgelöst werden.

Zukünftig werden Projekterfolge durch rechtzeitiges Erkennen und Beheben von Problemen bereits in den frühen Leistungsphasen der Planung verstetigt und die Einhaltung von Kosten, Zeiten und Qualitäten ermöglicht. Die kooperative Fertigstellung eines digitalen Bauwerkmodells bevor die Baustelle eingerichtet wird, soll den Projekterfolg sicherstellen. Es gilt: Erst digital dann analog. Der kooperative Planungsansatz erfordert dabei aber auch die Akzeptanz der BIM-Methode von allen am Bau Beteiligten, da ansonsten die kleinteilige Unternehmensstruktur der deutschen Bauwirtschaft diesem Ansatz die Grundlage entzieht.

Der nachfolgende Text stellt nach einer Einführung der BIM-Methode die Innovationsbereitschaft von Early- und Late-Adoptern gegenüber. Er untersucht dabei im Rahmen von Perspektiven unterschiedliche Positionen zum Einsatz der BIM-Methode in den frühen HOAI-Leistungsphasen. Abschließend werden die Positionen zu einem Gesamtbild zusammengefasst und Wege für einen kooperativen Planungsansatz mit Early- und Late-Adoptern aufgezeigt.

2 Building Information Modeling (BIM)

Betrachtet man den Entwicklungsprozess der BIM-Methode in Deutschland, so lassen sich uneinheitliche Positionen zur Einführung und Nutzung bei den am Bau Beteiligten beobachten. Einerseits begründet sich dieses Phänomen an der noch nicht vollzogenen Etablierung der BIM-Methode in Deutschland und andererseits an den präzisen Grenzen von Verantwortlichkeiten im Bau- und Planungswesen, die einer interdisziplinären Arbeitsweise entgegenstehen.

Eine Definition zur BIM-Methode findet sich im Stufenplan zur Einführung von Building Information Modeling (BIM) des BMVI: „Building Information Modeling bezeichnet eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden.“ (BMVI 2015, 4). Zusammenfassend lässt sich die BIM-Methode als modellbasierte und interdisziplinäre Planung beschreiben.

Ein dreidimensionales Modell visualisiert den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks von der Idee, über die Planung, den Bau und der Nutzung bis hin zum Rückbau. Räume und Bauteile werden in digitalen BIM-Modellen verknüpft und mit semantischen Informationen angereichert. Hierdurch können intelligente Raumkonfigurationen und Bauteile generiert werden, die u. a. eine automatische Generierung von Mengen- und Massenermittlungen ermöglichen (BORRMANN, KÖNIG, KOCH & BEETZ 2015, 93).

Die gemeinschaftliche, digitale Planung erfordert eine Zusammenarbeit über den Austausch von Informationen. Dieser Informationsaustausch findet mittels strukturierter Daten wie digitalen Bauwerkmodellen mit semantischen Informationen über den offenen Standard IFC (Industry Foundation Classes) statt. Alle am Bau Beteiligten partizipieren von diesem Standard, so dass er eine wesentliche Grundlage für einen interdisziplinären Planungsansatz darstellt.

Die Wirkung der BIM-Methode soll sich mit Hilfe der interdisziplinären Zusammenarbeit und des digitalen Bauwerkmodells über weniger Planungsfehler in den frühen HOAI-Leistungsphasen und die Reduzierung von Baukosten und -zeiten einstellen.

Die BIM-Methode wird regelmäßig mit „Kulturwandel des Planen und Bauens“ (BMVBS, BBSR & BBR 2013, 22 f.) attribuiert. Dieser Kulturwandel induziert Veränderungen an etablierten Planungs- und Bauprozessen. Mit Einführung der BIM-Methode werden neue Rollen und Verantwortlichkeiten entstehen, wodurch neue Berufsbilder wie BIM-Manager, -Kordinator und -Modellierer einhergehen werden.

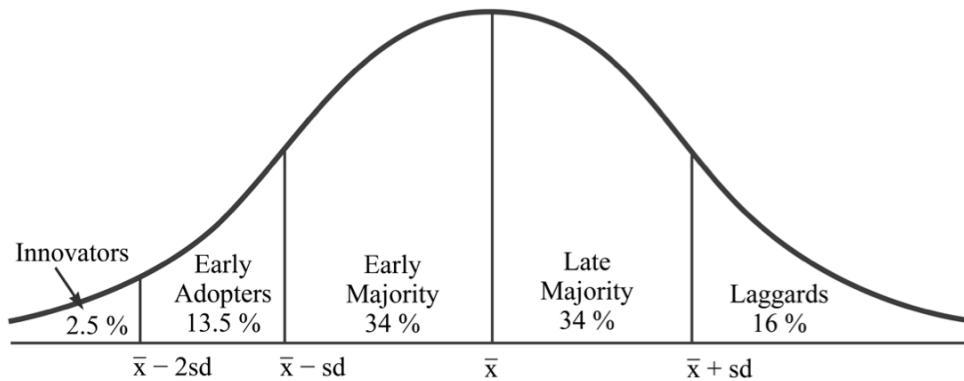
Die Zusammenarbeit über digitale Bauwerkmodelle und dem dazugehörigen Informationsmanagement erfordern zukünftig zentrale Datenbanken und Cloud-Lösungen wie Infrastructure as a Service (IaaS) und Software as a Service (SaaS). Insellösungen und lokal gespeicherte Planungsinformationen werden der Vergangenheit angehören.

Durch den Abschluss sämtlicher Planungen vor Baubeginn werden Planungsleistungen in die frühen Leistungsphasen verlagert (front-loading), wodurch diese an Bedeutung gewinnen werden. Der Auftraggeber wird auf diese Weise frühzeitig belastbare Entscheidungen durch hochwertige und konsistente Planungsinformationen treffen können (BMVBS, BBSR & BBR 2013, 25).

Aufgrund von Verzögerungen und Kostenüberschreitungen bei der Realisierung von Großprojekten wurde die Reformkommission Bau von Großprojekten vom ehemaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) 2013 initiiert, die ihre Ergebnisse im „Aktionsplan Großprojekte“ 2015 veröffentlicht hat. Der Aktionsplan umfasst 10 Handlungsempfehlungen, wobei eine Handlungsempfehlung die verstärkte Nutzung der BIM-Methode vorsieht (BMVBS 2015, 7 f.).

3 Early- und Late-Adopter

Die Begriffe Early- und Late-Adopter leiten sich aus der Adoptionstheorie ab, in der unterschiedliche Adopter-Typen, nach ihrer Bereitschaft Innovationen im Laufe der Zeit zu übernehmen, definiert sind (vgl. Abbildung 1). Everett M. Rogers (1931 - 2004) hat die Theorie unter dem Titel „Diffusion of Innovations“ im Jahr 1962 erstmalig veröffentlicht.



sd = standard deviations; \bar{x} = average time of adoption

Abb. 1: Kategorisierung von Adoptern nach Innovationsfähigkeit

E. M. Rogers hat diesen Adopter-Typen verschiedene Eigenschaften zugeschrieben, wobei die Innovationsfähigkeit relativ zu sehen ist und daher nur in Beziehung zur untersuchten Anwendungsmethode steht (ROGERS 1983, 245 - 251). Ein Early-Adopter der BIM-Methode kann zusätzlich einem anderen Adopter-Typ im Fachgebiet Parametrik entsprechen.

Im Modell von E. M. Rogers werden neben der Kategorisierung und Beschreibung von Adopter-Typen (vgl. Tabelle 1), auch deren prozentuale Verteilung innerhalb des Modells definiert, so dass sich Aussagen über den Adoptionsgrad einer Methode wie BIM treffen lassen.

Tabelle 1: Adopter-Typen

Adopter-Typ	Definition
Innovatoren (Innovators)	Sie erproben neue Ideen zuerst, verfügen über finanzielle Ressourcen, über ein hohes Maß an technischem Verständnis und sie importieren Innovationen außerhalb von Systemgrenzen.
Frühzeitige Anwender (Early Adopters)	Sie sind dem durchschnittlichen Individuum an Innovationskraft nicht weit voraus, übernehmen aber bereits kurz nach den Innovatoren vielversprechende Innovationen und teilen ihre gemachten Erfahrungen.
Frühe Mehrheit (Early Majority)	Sie nehmen, nach einer längeren Entscheidungsdauer, kurz vor dem Durchschnitt neue Ideen an, um nicht die Letzten zu sein.
Späte Mehrheit (Late Majority)	Sie nehmen kurz nach dem Durchschnitt neue Ideen an und treten Innovationen eher skeptisch gegenüber. Sie brauchen Normen und Regeln, die Beseitigung aller Unsicherheiten und äußeren Entscheidungsdruck, da es nicht ausreicht, sie lediglich vom Nutzen neuer Ideen zu überzeugen.
Nachzügler (Laggards)	Sie übernehmen als Letzte neue Ideen, so dass diese bereits wieder überholt sein könnten. Die Nachzügler verfügen nur über begrenzte Ressourcen und müssen sich daher relativ sicher vor der Übernahme neuer Ideen sein. Ihr spätes Handeln ist eine Vorsichtsmaßnahme.

Die späteren Adopter-Typen Late Majority und Laggards werden nachfolgend zum Typ Late-Adopter zusammengefasst.

4 Perspektiven und Positionen

Die Perspektiven beschreiben Rahmenbedingungen und Herausforderungen, die an Bau- und Planungsunternehmen gestellt werden, damit sich ein kooperativer, interdisziplinärer Planungsansatz etablieren kann, wobei sich die rechtliche Perspektive auf den Gesetzgeber und den behördlichen Instanzen bezieht.

4.1 Entwurfliche Perspektive

Für die Planung innerhalb der BIM-Methode gilt, je mehr Planungsinformationen mit einem digitalen Bauwerkmodell verknüpft sind, desto höher ihr Nutzen (BORRMANN, KÖNIG, KOCH & BEETZ 2015, 460). Denn mit zunehmender Informationsdichte steigt die Transparenz und werden die Planungsgrundlagen und Prognosen valider.

Die Genese des architektonischen Entwurfs steht dem Transparenzgedanken jedoch entgegen, denn das Entwerfen erfordert die Fähigkeit zum reflektierten Umgang mit Unschärfe (GÄNSHIRT 2011, 22). Wesentliche Parameter architektonischen Entwerfens entziehen sich wissenschaftlicher Denkansätze, da sie sich weder quantifizieren noch vorherbestimmen lassen (GÄNSHIRT 2011, 34). Das Entstehen einer Entwurfsidee ist daher abstrakt und intransparent.

Darauf folgend wird die Entwurfsidee in einem iterativen Prozess skizziert, beschrieben oder modelliert, und reflektiert. In Abhängigkeit zur Komplexität der Entwurfsidee und den indi-

viduellen Präferenzen werden hierfür analoge oder digitale Werkzeuge und Medien eingesetzt. Die Idee wird zunehmend konkreter und transparenter. Sie wird schließlich quantifizierbar und damit modellierbar.

Der Weg von der Entwurfsidee bis zum ersten Versuch, dieser Idee Form und Gestalt zu geben, vollzieht sich von abstrakt-intransparent zu konkret-transparent (GÄNSHIRT 2011, 64). Der Zeitpunkt der Quantifizierung wird von den Kreativen artikuliert.

4.2 Organisatorische Perspektive

Durch die Einführung der BIM-Methode entstehen neue Aufgaben, die in Bau- und Planungsunternehmen zu organisatorisch-personellen Veränderungen führen. Diese neuen Aufgaben werden in der Hauptsache eine Schnittmenge aus Kenntnissen der Ingenieur- sowie Informatikwissenschaften erfordern (BORRMANN, KÖNIG, KOCH & BEETZ 2015, 565).

Die Einführung der BIM-Methode wird daher voraussichtlich zu einer Fluktuation von Mitarbeitern führen, die dieser Entwicklung nicht mehr folgen oder Arbeitgeber verlassen, die weiterhin mit traditionellen Technologien arbeiten und sich dem Fortschritt entziehen. Jüngere Mitarbeiter in traditionell arbeitenden Bau- und Planungsunternehmen werden Schwierigkeiten haben, einen Arbeitsplatz in fortschrittlicheren Unternehmen zu finden, da sie nicht mit den Werkzeugen der BIM-Methode vertraut sind. Gerade der Wechsel älterer Mitarbeiter könnte zu einem Verlust von Wissen um das Planen und Bauen führen.

Mit der Einführung der BIM-Methode sind die neuen Tätigkeitsbereiche BIM-Management und BIM-Koordination entstanden, die nicht zwingend von Architekten sondern auch von entsprechend befähigten Fachleuten ausgefüllt werden können (BUNDESARCHITEKTEN KAMMER 2017, 6).

4.3 Rechtliche Perspektive

Die rechtliche Perspektive beschreibt die Kompatibilität zwischen der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) und der BIM-Methode.

Die HOAI reguliert die Vergütung von Planungsleistungen im Bauwesen. Sie ist ein nationales Preisrecht und für die Akzeptanz der BIM-Methode innerhalb der Architektenschaft von Bedeutung. Die HOAI ist ein deutsches Spezifikum und wird derzeit im Rahmen eines EU-Vertragsverletzungsverfahrens auf ihre Gültigkeit hin überprüft.

Im Unterschied zur internationalen Planungsmethodik trägt ein in Deutschland tätiger Planer die generelle Verantwortung für den gesamten Planungsprozess. Der national etablierte Planungsprozess orientiert sich dabei an den vordefinierten, aber nicht gesetzlich vorgeschriebenen HOAI-Leistungsphasen, denen ein linearer Planungsgedanke zugrunde liegt. Die HOAI lässt sich auf der einen Seite grundsätzlich mit einer modellbasierten, interdisziplinären Planung vereinbaren (ESCHENBRUCH & LEUPERTZ 2016, 152), auf der anderen Seite erfordert ihre zukünftige Anwendung im Hinblick auf die internationale Planungspraxis jedoch „ein Umdenken jenseits bestehender rechtlicher Strukturen“ (REKEN & WERNIK 2017).

Die Termin- (4D) und Kostenplanung (5D) wird durch den Einsatz der BIM-Methode transparenter und zuverlässiger. Vereinbaren Bauherr und Architekt die BIM-Methode als besondere Leistung, wird die Abgrenzung zu einer Grundleistung schwierig. Denn die ordnungsgemäße Erfüllung eines Auftrages erfordert die Termin- und Kostensicherheit (ESCHENBRUCH & LEUPERTZ 2016, 161). Die rechtliche Unsicherheit und das Abwarten von

gerichtlichen Entscheidungen oder Gesetzesnovellen sind Faktoren, die einer zügigen Etablierung der BIM-Methode entgegenstehen.

Die BIM-Methode wird zu einer höheren Planungsgenauigkeit in den frühen HOAI-Leistungsphasen Vor- und Entwurfsplanung führen, wodurch es zu Aufwandsverschiebungen aus späteren HOAI-Leistungsphasen kommen wird (front-loading) (ESCHENBRUCH & LEUPERTZ 2016, 158). Das vorzeitige Einpflegen von semantischen Informationen in das digitale Bauwerkmodell wird in der später folgenden Ausführungsplanung Zeit einsparen. Dieser erhöhte Aufwand ist dann entsprechend früher zu vergüten (ESCHENBRUCH & LEUPERTZ 2016, 159).

4.4 Technische Perspektive

Die technischen Erfordernisse der BIM-Methode werden von Bau- und Planungsunternehmen mit einem hohen Investitionsbedarf und der Ausbildung von Mitarbeiter in Zusammenhang gebracht. Hier haben Akteure mit einer aktuellen Ausstattung einen Vorsprung gegenüber jenen, die in der Vergangenheit zu wenig in eine technische Ausstattung und die Ausbildung von Mitarbeitern investiert haben.

Bauprojekte werden von Personen aus unterschiedlichen Fachrichtungen geplant und umgesetzt. Dabei nutzt jeder Mitwirkende seine eigene technische Infrastruktur wodurch gewachsene Dateninseln entstanden sind. Das Kennzeichen dieser Dateninseln sind Medien- und Informationsbrüche zwischen den am Bau Beteiligten und den verschiedenen Leistungsphasen, einhergehend mit nicht automatisierten Prozessen wie das manuelle Abgleichen von Listen. Die gängige Büroorganisation erfolgt mit Office-Anwendungen wie Microsoft Excel und Word.

5 Kooperation

Die Umstellung auf einen kooperativen Planungsansatz kann schrittweise erfolgen. Die Einführung einer Arbeitsweise nach der BIM-Methode im Bau- und Planungsunternehmen wird über einen längeren Zeitraum geschehen. Damit dieser Ansatz gelingen kann, sollte zunächst bei den am Bau Beteiligten ein Verständnis für die BIM-Methode wachsen. Dieses kann zunächst unternehmensintern, entlang eines Implementierungskonzepts, geschehen. Das Konzept wird von der Geschäftsleitung aufgestellt, die ein kleines Team aus internen Mitarbeitern für die Implementierung der BIM-Methode zusammengestellt und mit der Umsetzung eines überschaubaren Bauprojekts, parallel zur laufenden Planungspraxis beauftragt. Hier können Erfahrungen im Umgang mit der BIM-Methode gesammelt und Unterschiede zur täglichen Planungspraxis ermittelt werden. Diese Erfahrungen und Erkenntnisse werden im Anschluss im unternehmensinternen Rahmen ausgetauscht und Mitarbeiter geschult und mitgenommen. Anschließend kann ein erstes Projekt mit externen Projektpartnern innerhalb eines kooperativen Planungsansatzes umgesetzt und Erfahrungen ausgetauscht werden. Danach wird die Planung mit der BIM-Methode um Simulationen oder zusätzliche Aspekte erweitert (EASTMAN 2011, 28).

Der skizzierte Weg zu einem kooperativ, interdisziplinären Planungsansatz erfordert in der kleinteiligen Unternehmensstruktur der deutschen Bauwirtschaft flankierende Maßnahmen des Gesetzgebers sowie der behördlichen Instanzen, um die am Bau Beteiligten Late-Adopter in eine kooperative Arbeitsweise zu integrieren.

Die Legislative ist deshalb gefordert einen rechtlichen Rahmen zur kooperativen Planung zu schaffen. Ein rechtlicher Schwebezustand steht der Akzeptanz einer kooperativen Arbeitsweise entgegen. Solange dieser Zustand anhält, in dem Recht überwiegend durch Präzedenzurteile gesprochen wird, werden Bau- und Planungsunternehmen abwarten und dem kooperativen Planungsansatz nicht folgen.

Die Bauverwaltungen sind gefordert ihre Arbeitsweise zu digitalisieren. Sobald die Prüfung von Bauantragsunterlagen wesentlich auf Basis digitaler Bauwerkmodelle erfolgt, werden alle am Bau Beteiligten nachziehen müssen. Hier liegt ein wichtiger Hebel zur Implementierung der BIM-Methode in die kleinteilige Unternehmensstruktur der deutschen Bauwirtschaft.

6 Resümee

Die deutsche Bauwirtschaft hat kein Erkenntnis- sondern ein Umsetzungsproblem im Bezug auf die BIM-Methode. „Mit den heute verfügbaren leistungsfähigen und ausgereiften Softwareprodukten für das BIM-gestützte Arbeiten steht der Umsetzung der BIM-Methodik grundsätzlich nichts mehr im Wege.“ (BORRMANN, KÖNIG, KOCH & BEETZ 2015, V).

Es fehlt aber nach wie vor an best-practice Beispielen aus Deutschland, gerade im Hinblick auf den nationalen Gesetzesrahmen für das Bauwesen und die Informationssicherheit. Die dokumentierten Erfahrungen aus internationalen, abgeschlossenen BIM-Projekten können hingegen unter technischen Gesichtspunkten hilfreich sein.

Die deutschen Akteure scheuen die Einführung der BIM-Methode, sofern Auftraggeber diese nicht einfordern. Ein Architekt oder Ingenieur, dessen Büroprofil hauptsächlich auf Bauaufgaben nach dem öffentlichen, gewerblichen oder industriellen Spektrum ausgerichtet ist, wird sich mit den Aspekten der kooperativen Planungsmethode befassen müssen, da öffentliche Auftraggeber und Investoren valide und transparente Planungsentscheidungen stärker einfordern werden als dies in der Vergangenheit der Fall war.

Ein Architekt oder Ingenieur, dessen Büroprofil auf Wettbewerbe ausgerichtet ist und Bauprojekte maximal bis zur Genehmigungsplanung (Leistungsphase 4 nach HOAI) entwickelt, wird noch kreative Anteile in der abstrakt-intransparenten Phase eines Entwurfes haben, die sich auf absehbare Zeit nicht automatisieren lassen werden.

Die BIM-Methode hat sich bereits im internationalen Umfeld durchgesetzt, so dass es nur eine Frage der Zeit ist, wann BIM auch in Deutschland etabliert sein wird. Die BIM-Methode wird angetrieben durch Politik, öffentliche und internationale Auftraggeber sowie Investoren, die auf eine verlässliche Planung mit validen Prognosen zu Baukosten und -zeiten angewiesen sind.

Wendet man die Kategorisierung von E. M. Rogers auf die am Bau Beteiligten in Deutschland an, so wird etwa die Hälfte aus marktwirtschaftlichen Mechanismen heraus die BIM-Methode übernehmen. Die andere Hälfte benötigt darüber hinaus einen Gesetzesrahmen für die Anwendung einer kooperativen Planungsmethode und Entscheidungsdruck von außen durch behördliche Instanzen oder andere Marktteilnehmer.

Literatur

- BMVBS (2015), Aktionsplan Großprojekte. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/reformkommission-bau-grossprojekte-aktionsplan.pdf> (26.11.2017).
- BMVBS, BBSR & BBR (2013), BIM Leitfaden für Deutschland. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bim-leitfaden-deu.pdf?__blob=publicationFile (26.11.2017).
- BMVI (2015), Digitales Planen und Bauen - Stufenplan zur Einführung von Building Information Modeling (BIM). https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile (26.11.2017).
- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C. & BEETZ, J. (Hrsg.) (2015), Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- BUNDESARCHITEKTENKAMMER (Hrsg.) (2017), BIM für Architekten. Leistungsbild. Vertrag. Vergütung. <https://www.bak.de/w/files/bak/03berufspraxis/bim/bim-bak-broschuere-web.pdf> (05.01.2018).
- EASTMAN, C. M. (Hrsg.) (2011), BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. 2. Aufl., Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- ESCHENBRUCH, K. & LEUPERTZ, S. (Hrsg.) (2016), BIM und Recht. Werner Verlag, Köln.
- GÄNSHIRT, C. (2011), Werkzeuge für Ideen. Birkhäuser, Basel.
- REKEN, S. & WERNIK, S. (2017), BIM und HOAI passen nicht zusammen. <https://www.immobiliienmanager.de/bim-und-hoai-passen-nicht-zusammen/150/52193/> (05.01.2018).
- ROGERS, E. M. (1983), Diffusion of Innovations. 3. Aufl., The Free Press, New York.

Existing Situation of BIM in Academia in Germany and Guidelines for Future

Sairah Badar

Dessauer Institut für Baugestaltung · HS Anhalt · Seminarplatz 2a · 06846 Dessau ·

E-Mail: sairah.badar@hs-anhalt.de

Building information modeling (BIM) refers to digitalization of physical and functional data of a building in virtual digital model(s). These digital models are generated by means of numerous computer software developed for various construction design phases e.g. architectural modeling, structural design etc. BIM has transformed the techniques how construction data is produced, documented, visualized and shared. Building construction data with BIM is generated from digital models and collaborated among design team members in a virtual environment. Compared to traditional building construction methods BIM facilitates financial efficiency and swift construction processes due to transparent data exchange in virtual working environment. For its benefits, BIM has rapidly found its way in construction industry. Yet its advancement requires skillful professionals to work in virtual environment. However infiltration of BIM in academia is not in pace with construction industry. Architecture, engineering and construction (AEC) academic institutions must prepare students for these challenges. Higher education institutions in Germany are also faced with the challenge of effectively incorporating BIM in their curriculums. This paper studies the status quo of BIM in the curriculum of architectural institutions of higher education in Germany. Then it compares this situation with suggestions from literature. The study finds out that attempts to integrate BIM in architectural courses is at early stages. Largely the architectural courses teach the computer aided drafting (CAD), which does not fulfill the BIM philosophy. Moreover, these courses are essentially stand-alone courses without integrating the subject related knowledge. In addition, these courses largely focus on teaching software applications rather than principles of BIM. The paper concludes with an introduction of primary to advanced levels of BIM proficiency skills at multiple stages during undergraduate studies.

Keywords: BIM, BIM in Academia, Digitalization of Building Construction Data

1 Introduction

1.1 Background

Digitalization has transformed the means of performing tasks almost in every wake of life e.g. online banking has replaced cheque book and smart-phone has almost replaced telephone. Incorporation of digital revolution in construction design has manifested itself in virtual working environment called building information modeling (BIM). As mentioned above, BIM refers to digitalization of physical and functional data of a building in virtual digital model(s) generated by means of BIM tools/computer software. Director of RIBA Enterprise Dr. Stephen Hamill simplifies the concept in his words “build it twice; once digitally and once physically. If you build it first digitally, then you know that it fits properly” (NIBS, 2011).

BIM has numerous dimensions and has been defined by many scholars and institutions in various ways. It has been recognized as a product - a three dimensional building model embedded with visual and non-visual construction data inside (SUCCAR, 2015; Crotty, 2014) - and as a process based on a parametric modeling (SABONGI, 2009; Crotty, 2014). which facilitates efficient construction process (BOZOGLU, 2016) and reduces wastage in construction supply throughout the process (KIVINIEMI & KOCATURK, 2013). A well representative description of BIM is presented by NIBS as follows; “a digital representation of physical and functional characteristics of a facility that serves as a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its life cycle from inception on-wards.” (NIBS, 2008). In short BIM can be described as creation and management of digital building models for extraction of construction data of a facility / building to understand the physical and functional aspects of a building before it is physically built and afterwards.

Digitalization of construction data and data sharing modes are key determinants in defining BIM working method. They also determine maturity level of BIM in a construction project which can be against Bew-Richards BIM Maturity Model developed by Mark Bew and Mervyn Richards in the year 2008 (See Figure 1).

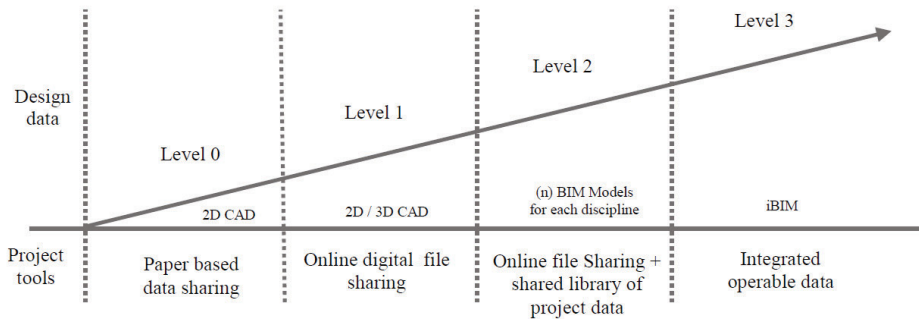


Fig. 1: adaptation of Bew-Richard BIM Maturity Model

Bew-Richards BIM Maturity Model consists of four levels according to extent of digitalization into building project lifecycles with reference to data format, tools employed and level of cooperation among the project participants. The lowest tier in the Bew-Richard maturity model is defined as level 0 or pre-BIM level. It represents the traditional working method. Project participants essentially employ computer aided design (CAD) to create two dimensional drawings and building element data is produced in spread-sheet format with no direct connection between them. Project participants exchange building data by means of two-dimensional paper based drawing generated from CAD drawings. In next level three dimensional building objects and models with parametric associations replace manually generated two-dimensional data. Although the building models from various disciplines can be digitally shared yet information exchange remains linear, non-aligned and disassociated (SUCCAR, 2009) and the cooperation among project participants remains at coordination rather than collaboration level. At level two the building models can be aligned and shared

online in a common data environment but not necessarily in a real time. While in third level of BIM maturity these digital models can be developed, hosted and shared in a common data environment by all project participants in real time.

1.2 Building Information Modeling in Academia

Building information modeling with its virtual working environment requires skills different from the traditional working practices in construction industry. Skillful professionals to work in a BIM environment is still a challenge in adoption of BIM to its full extent (AZHAR & HEIN, 2011). Here educational institutions play a key role in preparing BIM-competent workforce. Many universities have tried to leverage BIM in academia but only few have succeeded (BOZOGLU, 2016) while others are still struggling (YAN, 2010) partly or entirely.

Literature identifies three main approaches adopted by educational institutions to incorporate BIM in curriculum. One of them is single course focused on teaching BIM through a software application. This approach is not considered ideal for it does not prepare students for collaborative working environment challenges of BIM (SABONGI, 2009). Another widespread approach is to integrate BIM in an existing course which Lee (2015) considers as the most practical approach for high quality of knowledge. Third approach considered the most effective is by introducing collaborative interdisciplinary courses among related faculties from AEC education to teach the students BIM collaboration process among project participants (BARISON & SANTOS, 2010).

Lack of space in curriculum for additional courses and ambiguity in course structure to incorporate BIM in related modules (SABONGI, 2009) are considered the most critical challenges faced by academia in integrating BIM in curriculum. A three-leveled course structure - based on the maturity levels starting from BIM modeler through BIM analyst and BIM manager level - has been proposed by many scholars to overcome the issues. A BIM modeler course either by replacing or combining with digital graphic representation course focusing on modeling and visualization with a BIM tool can be introduced at first level. At the intermediary level discipline specific knowledge and design fundamentals in BIM could be integrated in design studio. At third level BIM implementation in construction process, communication, collaboration and construction management can either be introduced among disciplines or collaborative studio (BARISON & SANTOS, 2010, Lee, 2015). Kymmel (2008) proposes a similar three-phased approach by introducing modeling and analyzing skills within first two years, introduction of concepts of teamwork and collaboration in following year and to work on actual construction projects with related firms in final year.

Literature shows that German higher educational institutions are also struggling with the issue. Although number of institutions offering BIM related courses is already on the rise from 28 to 41 and number of modules from 36 to 67 from 2015 through 2017. However, a large percentage of these modules belongs to elective courses and only a few are offered as compulsory courses. But infiltration of BIM in architectural courses (22 out of 67) is comparatively lower than in civil engineering programs (BROKBLAS AND CADEZ, 2017).

1.3 Research Question(s)

This research evaluates BIM related courses offered in bachelor study programs in Germany to get answers to following questions;

1. Which of three (above mentioned) approaches to incorporate BIM in curriculum is adopted in German higher education of architecture in Germany?
2. Compared to Bew-Richards BIM Maturity Model, to what extent digitalization of building construction data and processes is taught in architectural courses in Germany?
3. Which maturity levels - from BIM modeler through BIM analyst and BIM manager level - can be achieved through the contemporary course structure offered in architectural bachelors program?
4. Which steps can be taken to improve course content and course structure for the architecture education?

2 Research Methodology

A list of institutions offering architectural courses at bachelor level has been obtained from German Academic Exchange Service (DAAD) website to study present situation of BIM in academia in German architectural education. According to which 54 institutions including both universities and universities of applied sciences offering bachelor programs in architecture in Germany are taken as study sample. For 4 out of 54 institutions no data is found, so the sample size is reduced to 50. Module handbooks are used to study contents of BIM-related modules. Content analysis has been used as a method to analyze data and then recommendations have been proposed on basis of literature review.

It is essential to mention here the limitations and delimitations of the study. The research solely focus on data extracted from online official documents, which bears a possibility that actual situation can vary to some extent as online data in some cases is current.

3 Results

A content analysis of data shows that only 8 out of 50 educational institutions explicitly offer BIM in their curriculum. Rest of institutions still teach two-dimensional drafting and three-dimensional modeling without any direct reference to integrate BIM in academia. Among those offering BIM in curriculum largely focus on parametric modeling aspect of BIM, only half of them (4/8) claim to introduce additional aspects like digital process and interoperability in BIM. While others (42/50) only offer digital drafting and building modeling without any intent inducing BIM.

The courses related to digital building model and processes are largely taught in digital graphic representation courses. Such courses are spanned over two semesters and are offered at start of architectural training from first through second semesters. Only in a few cases the courses are offered later than second semester. Digital graphic representation courses either BIM based or not, both focus on process solely with reference to Computer-

aided design (CAD), Computer-aided architectural design (CAAD) or BIM software as stand-alone courses without any affiliation to other subject related modules.

4 Conclusion and Discussion

The study shows that integration of BIM in undergraduate architectural courses in Germany is far from ideal situation. Apart from few institutions claiming to teach BIM, by enlarge digital building modeling skills are taught under the heading of digital graphic representation (DGR). These courses focus on two-dimensional drafting and three dimensional building models largely for visual representation without an intent to extract non visual building data from these models. Moreover the courses are designed as stand-alone approach to teach CAD or CAAD software applications with no direct association to other subject. The stand-alone approach is not considered an ideal variant among three prevalent approaches but the situation can be improved by linking these modules with existing courses, through which students can actually learn to incorporate subject related knowledge in digital format. Besides CAD and CAAD software can be replaced with alternative BIM tools for architects. So to say DGR courses can be upgraded to BIM confirming courses.

An assessment of digitalization skills taught in current architectural courses against the Bew-Richard model shows that contemporary course content can only prepare the students for level one of BIM maturity. It teaches to generate three dimensional building models (in some cases with parametric associations) yet information exchange stays one-directional and non-aligned, as modules lack an interdisciplinary approach in course design.

Literature suggests to impart BIM related skills in three phases - primary, intermediate and advanced - over entire period of studies. While DGR and or BIM courses offered in german architectural institutions are generally placed in the early stages of architectural training. Moreover they are aimed at BIM modeler or primary level training. It leaves the students unprepared for the intermediate and advanced level of BIM maturity skills. If the educational institutions in germany intend to catch up with the advancement in BIM in industry they must modify content and structure of related courses accordingly. Moreover adapting to multi-leveled induction of courses in the curriculum to develop varying BIM proficiency skills among the students. It is essential to teach BIM principles with reference to the subject related knowledge as students can easily grasp the induction of visual and non-visual attributable data in a digital building model. Information extraction from digital models, data exchange and collaboration among project participants is a key component in BIM working environment, entirely lacking among the studied courses, needs to be introduce to prepare the future taskforce to work in a BIM conforming environment.

Although this research has solely focused on studying the issue for architectural studies but it can be replicated for related disciplines. The same guidelines can be employed to explore the situation of BIM in civil engineering courses. Moreover it can also be extended for BIM conforming subject related course formulation for each discipline. In short there are many gaps in the subject which are needed to be addressed.

Literature

- AZHAR, S. S., & HEIN, M. (2010). BIM undergraduate capstone thesis: Student perceptions and lessons. Proceedings of the 46th ASC Annual Conference, Boston, MA.
- BARISON, M. B., & SANTOS, E. T. (2010). BIM teaching strategies: an overview of the current approaches. International Conference on Computing in Civil Engineering . Nottingham University Press.
- BARNES, P., & DAVIES, N. (2015). BIM in Principle and Practice. London: ICE Publishing.
- BECKERIK-GERBER, B., GERBER, D., & KU, K. (2011). The pace of Technological Innovation in Architecture, Engineering and Construction Education: Integrating recent trends into the curricula. Journal of Information Technology in Construction, S. 411-432.
- BOZOGLU, J. (2016). Collaboration and coordination learning modules for BIM education. Journal of Information Technology in Construction, S. 152-162.
- BROKBALS, S., & CADEZ, I. (2017). Academic Teaching of BIM in Germany. 13th International Conference on Organization, Technology and Management in Construction. Zagreb: Croatiaian Association for Construction Management.
- CROTTY, R. (2014). Why BIM? In R. Klaschka, BIM in Small Practice Illustrated Case Studies (S. 83-86). New Castle: NBS.
- KIVINIEMI, A., & KOCATURK, T. (2013). Challenges of Integrating BIM in Architecture Education. 31st International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Delft.
- KYMMEL, W. (2008) Building information modeling: planning and managing construction projects with 4D CAD and simulations, McGraw-Hill.
- LEE, N., & HOLLAR, D. A. (2013). Probing BIM education in Construction engineering. 49th ASC Annual International Conference. San Luis Obispo: ASC.
- National Institute of Building Sciences. <https://www.nibs.org/> (25.04.2018).
- SABONGI, F. J. (2009). The Integration of BIM in Undergraduate Curriculum: an analysis of undergraduate courses. 45th Associated Schools of Construction Annual International Conference Proceedings. Gainesville: ASC.
- YAN, W. (2010). Teaching Building Information Modeling at Undergraduate and Graduate levels. Future Cities: 28th eCAADe Conference Proceedings (S. 97-106). Zurich: eCAADe.

Eingabedaten für eine IFC-gestützte Brandsimulationsrechnung

Moritz Boxheimer¹, Dominique Max² und Andreas Geiger³

¹Forschungsstelle für Brandschutztechnik · Karlsruher Institut für Technologie · Herzstraße 16 · 76187 Karlsruhe ·

E-Mail: moritz.boxheimer@gmail.com

²Forschungsstelle für Brandschutztechnik · Karlsruher Institut für Technologie · Herzstraße 16 · 76187 Karlsruhe ·

E-Mail: dominique.max@kit.edu

³Institut für Automation und angewandte Informatik · Karlsruher Institut für Technologie · Hermann-von-Helmholtz-Platz 1 · 76344 Eggenstein-Leopoldshafen ·

E-Mail: andreas.geiger@kit.edu

Brandschutzkonzepte weisen die Einhaltung bauordnungsrechtlicher Anforderungen nach. Konventionelle Brandschutznachweise folgen dabei gesetzlichen Vorgaben und technischen Regeln. Dabei umfassen diese Richtlinien ein Gebäudespektrum, das der gebauten Wirklichkeit nicht immer gerecht werden kann. Im Bauwesen findet ein Umdenken statt, von pauschalen Richtlinien hin zur individuellen Betrachtung eines Bauwerks. Im Zentrum stehen dabei computergestützte Methoden der Brand- und Strömungsberechnung zur Ermittlung von Brandkenngrößen. Die so genannten Ingenieurmethoden ermöglichen eine bauwerkspezifische Betrachtung zur Erreichung bauordnungsrechtlicher Schutzziele. Das Durchführen von Bemessungen im brandfall durch CFD-Programme setzt einen hohen Informationsstand zur Bauwerksstruktur voraus. BIM-gestützte Gebäudemodellierung liefert einen Teil der benötigten Informationen. Voraussetzung ist eine Datenschnittstelle zwischen BIM und Bemessungssoftware. Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit den benötigten Eingabeparametern und dem dazu gehörenden Informationsumfang in der IFC-Datenstruktur.

Keywords: BIM, IFC, CFD, Brandschutz, Brandsimulation

1 Brandschutzbemessung

1.1 Brandschutzkonzepte

Die konkrete Umsetzung zur Erfüllung der Anforderungen gibt das Bauordnungsrecht über technische Regeln oder über Bauordnungen vor. Die Ausführung von Brandschutzvorgaben als Teil des Bauordnungsrechtes ist Ländersache und insbesondere durch die jeweiligen Landesbauordnungen geregelt. Zur Vereinheitlichung des Baurechts orientieren sich die Landesbauordnungen weitestgehend an der Musterbauordnung (MBO) der Bauministerkonferenz. Die grundsätzlichen Schutzziele an den Brandschutz werden in §14 MBO genannt:

„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Mensch und Tier sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“

In den folgenden Paragraphen der MBO werden die Anforderungen an die Bauteile des Gebäudes konkretisiert. Der Brandschutznachweis, welcher in der Regel Bestandteil im bauordnungsrechtlichen Verfahren ist, konkretisiert die Anforderungen an Bauteile, technische Anlagen und Rettungswege, die eingehalten werden müssen um die Schutzziele nach § 14 MBO zu erfüllen. Dabei beziehen sich die Nachweise im Allgemeinen auf die konkreten materiellen Anforderungen, die sich aus den Bauordnungen und den eingeführten technischen Regeln ergeben.

Anforderungen betreffen beispielsweise die Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen, die Beschränkung der Rettungsweglänge zur Sicherstellung einer schnellen Rettung, oder die Vorgabe einer qualifizierten Rauchableitung aus dem Gebäude zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen und Unterstützung der Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr.

Dabei umfassen diese materiellen Anforderungen ein Gebäudespektrum, das der gebauten Wirklichkeit nicht immer gerecht werden kann. Die Beurteilung des Brandverhaltens der Gebäudebauteile basiert auf einem Brandverlauf der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK). Die ETK orientiert sich an Zimmerbränden von Wohngebäuden. Insbesondere beim Neu- oder Umbau von Gebäuden besonderer Art oder Nutzung kann es erforderlich werden, von diesen Anforderungen abzuweichen und in einer individuellen Betrachtung Gebäude und ihre Anforderungen zu bewerten.

Die gesetzliche Grundlage für Abweichungen leitet sich ab aus §67 Absatz 1 Satz 1 MBO. Abweichungen zu konkreten Anforderungen sind zulässig, sofern die angestrebten Schutzziele anderweitig erfüllt werden können.

Zur Nachweisführung eignen sich Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Mit diesen Methoden kann beispielsweise nachgewiesen werden, dass die zu erwartende Brandeinwirkung auf ein Bauteil gering ist, so dass eine geringere Feuerwiderstandsklasse als ausreichend erachtet werden kann.

2 Ingenieurmethoden des Brandschutzes

Die Beurteilung der Folgen eines Brandes setzt weitreichende Kenntnisse über den möglichen Brandverlauf voraus. Grundsätze zur Brandsimulation wurden zwar schon in den fünfziger Jahren ermittelt, die praktische Anwendung wurde jedoch lange durch die technischen Limitierungen der Rechenleistung verhindert. Durch den rasanten Anstieg der Rechenleistung gängiger Computersysteme in den letzten Jahren vervielfältigten sich die Möglichkeiten der Nachweisführung mit Ingenieurmethoden.

Zur Bemessung von Bauteilen oder Rauchableitungssystemen stehen unterschiedliche Modellansätze zur Verfügung. Es werden vor allem die folgenden drei Gruppen unterschieden. Einzonenmodelle zur Simulation von Bränden in der Vollbrandphase, Mehrraum-Mehrzonenmodelle und Feldmodell (CFD-Modelle) zur Simulation von Bränden in der Entstehungsbrandphase.

Die Modelle basieren auf Grundsätzen der Thermodynamik und Strömungsmechanik. Die Zustandsbeschreibung innerhalb des Rechenbereichs erfolgt über Erhaltungssätze für Masse und Energie sowie weiterer Ansätze für Transportgrößen wie Strahlungs-, oder Speziestrans-

port. Bei Einzonenmodellen bildet der Brandraum als solches das Kontrollvolumen. Mehrraum-Mehrzonenmodelle unterteilen den Brandraum und die daran angrenzenden Räume (Mehrraum) jeweils in zwei Zonen. Die Grundannahme eines Zweizonenmodells ist ein homogener Zustand der Brandkenngrößen über die gesamte Zone. Als Zone gilt die Rauchschicht unter der Decke sowie eine raucharme Schicht am Boden.

Feldmodelle unterteilen den Brandraum hingegen in endlich viele Kontrollvolumina. Feldmodelle können die Zustände im Brandbereich genauer darstellen als Zonenmodelle. Berechnungsgrößen werden nicht nur global für die Zone ermittelt, sondern in jedem im Raum definierten Kontrollvolumen lokal ermittelt. Die dafür notwendigen physikalischen Zusammenhänge sind über die Grundgesetze der Strömungsmechanik bekannt und in den Navier-Stokes-Gleichungen zur Lösung der Strömung zäher, isotroper Flüssigkeiten ausformuliert. Bei der Navier-Stokes-Gleichung wird das Gleichungssystem, mit der aus dem Zonenmodell bekannten Energieerhaltung und der Masseerhaltung um die drei Gleichungen, der Impulserhaltung in den Koordinatenachsen erweitert. Der so verfeinerte Ansatz ermöglicht die Ermittlung der heterogenen Zustände über den gesamten Brandraum während der Entstehungsbrandphase.

Die EDV-gestützte Brandsimulation erfolgt in mehreren Schritten. Unterschieden werden das Erstellen des Bemessungsfalles (Pre-Processing), die Durchführung der Berechnung (Solving) und die Ergebnisauswertung (Post-Processing).

Ziel des Pre-Processings ist das Definieren der Anfangsbedingungen für die Berechnung, die Modellierung der Gebäudegeometrie sowie das Ansetzen eines Brandszenarios. Von Bedeutung sind alle Kennwerte, die mit den Energietermen und den Masseanteilen der Energie- und Massebilanz interagieren.

2.1 Grundlagen der Bilanzierung von Bränden

Beispielgebend für die grundlegenden Phänomene eines Brandes, wird die Bilanzierung anhand eines stark vereinfachten Falles gemäß Abbildung 1 gezeigt. Die Bilanzierung erfolgt ausgehend von einem Brand mit dem Eintrag von Energie (Wärme) und Masse (Rauchgas). Die Sätze zur Bilanzierung werden für die Energieerhaltung nach Gleichung 1 und für die Masseerhaltung nach Gleichung 2 aufgestellt

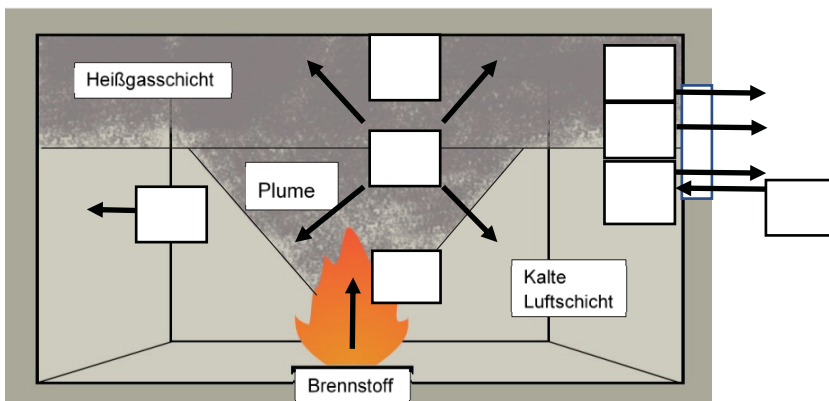


Abb. 1: Wärmeströme eines Brandraumes

$$\dot{h}_c - (\dot{h}_1 + \dot{h}_o + \dot{h}_w + \dot{h}_g + \dot{h}_s) = 0 \quad (1)$$

\dot{h}_c die pro Zeiteinheit durch Verbrennung und Brandnebenerscheinung im Brandraum freigesetzte Energie

\dot{h}_1 die durch den Gaswechsel (Konvektion durch Öffnungen) pro Zeiteinheit abströmende Energie der Rauchgase (Konvektionsenergie)

\dot{h}_o die durch die Fensterstrahlung pro Zeiteinheit entzogene Energie

\dot{h}_w die durch die Konvektion und Strahlung an die Umfassungsbauteile pro Zeiteinheit abgegebene Energie

\dot{h}_g die im Brandraum pro Zeiteinheit gespeicherte Energie der Rauchgase, welche die Brandraumtemperatur bestimmt

\dot{h}_s sonstige pro Zeiteinheit verlorene Energieanteile (z. B. Speicherenergie von Einbauteilen)

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_1 + \dot{R}) = 0 \quad (2)$$

\dot{m}_g die pro Zeiteinheit aus dem Brandraum strömenden Rauchgasmengen

\dot{m}_1 die pro Zeiteinheit in den Brandraum einströmende Frischluftmenge

\dot{R} die pro Zeiteinheit umgesetzte Brandlast, welche die Energiefreisetzung bewirkt

Der Energiestrom in ein Bauteil \dot{h}_w kann durch Gleichung (3) beschrieben werden:

$$\dot{h}_w = A_j \cdot (\alpha_j (T_g - T_{w,j}) + \varepsilon_{res} \cdot \sigma (T_g^4 - T_{w,j}^4)) \quad (3)$$

A_j : Die wärmebeaufschlagte Bauteiloberfläche des Bauteils j

α_j : Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient am Bauteil j

T_g : Die Heißgastemperatur

$T_{w,j}$: Wandtemperatur des Bauteils j

ε_{res} : Emissionsfaktor des Bauteils j

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante

Der erste Summand der obigen Gleichung spiegelt den konvektiven Wärmeübergang und der zweite Summand den Wärmeübergang durch Strahlung wider. Die Bauteiltemperatur $T_{w,j}$ ist unbekannt und wird durch die Lösung der (instationären) Fourierrechnung Gleichung (4) mit den entsprechenden Randbedingungen (Wärmestrom und Außentemperatur) bestimmt.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_w}{\rho_w c_{pw}} \cdot \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \quad (4)$$

c_{pw} : spezifische Wärmekapazität

t : Zeit

x : Koordinate in Richtung der Bauteiltiefe

λ_w : Wärmeleitung

Mit den Parametern λ_w , ρ_w und c_{pw} stehen hinter der Lösung von Brandsimulationsrechnungen bauteil- und baustoffspezifische Eingabeparameter.

2.2 Einbinden von BIM-Modellen in die Brandbemessung

Building Information Modeling bezeichnet die Aufnahme aller verfügbaren Informationen zu einem Gebäude in einem Informationsmodell. Teil des Gedankens von BIM ist das Schaffen von Schnittstellen zwischen Softwaresystemen zur Vermeidung von Informationsverlusten während der Planung. Dabei bestehen auch Schnittstellen zur Brandschutzplanung.

Teile des Pre-Processings betreffen spezifische Themen der Brandbemessung. Dazu gehören z. B. zeitliche Abläufe innerhalb des Brandszenarios, etwa die brandbedingte Bauteilzerstörung. Daneben bildet das Gebäudemodell Randbedingungen der Berechnung. Die benötigten Eingabeparameter zum Gebäudemodell können zumindest teilweise aus einem BIM-Modell entnommen werden. Dadurch kann der Arbeitsaufwand von Brandschutzbemessungen gesenkt und damit eine hohe Wirtschaftlichkeit erzielt werden.

Der Informationsaustausch findet in beide Richtungen statt. Der Brandverlauf kann durch Elemente des technischen Brandschutzes (Sprinkler, Brandmelder, Rauchabzüge etc.) beeinflusst werden. Die Notwendigkeit von Maßnahmen des technischen Brandschutzes, sowie teilweise deren Auslegung (bspw. Größe und Anzahl von Rauch- und Wärmeabzügen) ist Teil des Post-Processings. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen wiederrum ein in die BIM-Prozesskette.

3 Praktisches Beispiel: Fire Dynamics Simulator

3.1 BIM-Schnittstelle der Bemessungssoftware

Das Einbinden von BIM-Modellen in die Brandsimulationsrechnung ist nur unter Vorbehalten möglich. Mit IFC steht den Planern ein weitgehendes Datenformat zum Informationsaustausch zur Verfügung. Es fehlt jedoch in der Regel die Datenschnittstelle auf Seiten der Bemessungssoftware.

Im weiteren Verlauf wird das Open-Source-Projekt Fire Dynamics Simulator (FDS) betrachtet. Dieses ist ein gebräuchliches Tool für die Durchführung von Brandsimulationsrechnungen und ist den Feldmodellen zuzuordnen. Das Programm unterstützt keinen direkten Import von IFC-Dateien. Die standardmäßige Eingabe erfolgt über ASCII Dateien (reinen Textdateien) in denen über Schlüsselwörter die Rahmenbedingungen für die Berechnung gesetzt werden. Der Modellimport wird allenfalls von verschiedenen Third-Party-Programmen ermöglicht. Viele Übersetzer berücksichtigen ausschließlich die Geometrie. Sachdaten und Materialparameter etc. werden meist nicht berücksichtigt.

Das Folgende Beispiel (vergleiche Abbildung 2) zeigt die Umwandlung eines beispielhaften Gebäudes von IFC in das Datenformat von FDS. Das IFC-Modell basiert auf IFC 2x3 und wurde mit ARCHICAD 20 erzeugt. Die Übersetzung der Datei erfolgt durch das FDS Export PlugIn der Modellierungs-Software Blender.

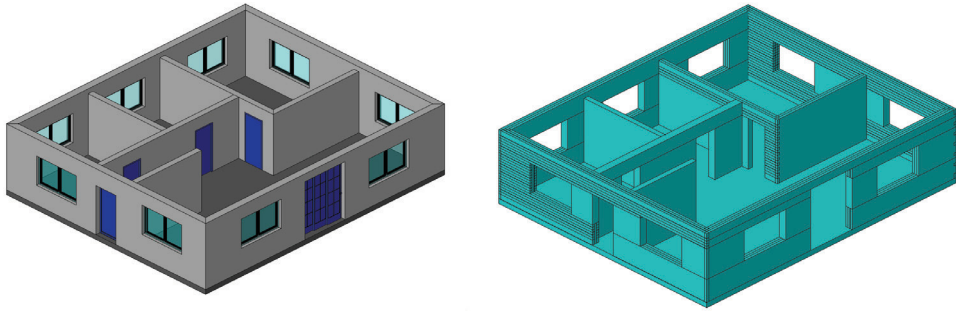


Abb. 2: Visualisierung der Umwandlung eines Gebäudes von IFC (links) zu FDS (rechts)

3.2 Modellierung in der Bemessungssoftware FDS

Der Aufbau und die benötigten Eingabeparameter von Bauwerkselementen in FDS soll anhand eines kurzen Beispiels erläutert werden. Das Modell besteht aus einer Wand mit einer Wandöffnung. Das Erzeugen von Bauteilen erfolgt im FDS-Datenmodell über den Aufruf definierter Eingabegruppen mit zugehörigen Attributen:

```
&MISC      TMPA=20, HUMIDITY=40, /
&MATL      ID='BRICK', CONDUCTIVITY=0.69, SPECIFIC_HEAT=0.84,
            DENSITY=1600, EMESSIVITY=0.9 /
&SURF      ID='BRICK WALL', MATL_ID='BRICK', COLOR='RED',
            BACKING='EXPOSED', THICKNESS=0.20 /
&OBST      XB=0.0,5.0,1.0,1.2,0.0,3.0, SURF_ID='BRICK WALL' /
&HOLE      XB=2.0,3.0,0.9,1.3,0.9,2.2 /
```

&MISC definiert unter anderem die Rahmenbedingungen zur Umgebungsatmosphäre der Berechnung. Hier beispielsweise Temperatur und Luftfeuchte.

&OBST erzeugt die Geometrie des Bauelements. Die Eingabegruppe erzeugt ein Bauteil oder sonst geartetes Hindernis (Obstruction). Hindernis bezieht sich hier auf die Strömungsverhältnisse im Kontrollvolumen. Die Randbedingungen von physikalischen Größen wie der Brandintensität werden über andere Eingabegruppen erstellt, auf welche in diesem Rahmen nicht eingegangen wird. Die Geometrie wird als Bounding Box (Quader) beschrieben. Es werden die Koordinaten zweier gegenüberliegender Eckpunkte definiert, über die der Körper aufgespannt wird. Elemente lassen sich somit ausschließlich als Quader erzeugen.

&SURF beschreibt die Interaktion der Oberfläche eines Elementes mit den angrenzenden Kontrollvolumen oder der Außenumgebung. Die zugeordneten Attribute umfassen die mögliche Schichtung eines Bauteils, die Rahmenbedingungen (Temperatur) an den Schichten sowie den Energieeintrag in den Raum über die (brennende) Oberfläche eines Bauteils im Brandfall, wenn die Oberfläche den Brandherd darstellt.

&MATL gibt physikalische Eigenschaften von Baustoffen, wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte, vor. Zusätzlich können brandbedingte Umwandlungsprozesse von Materialien berücksichtigt werden.

&HOLE erzeugt eine Öffnung in einem Element. Das Öffnungselement wird als Quader erzeugt. **&HOLE** bildet lediglich eine Öffnung, Füllelemente (Fenster, Tür) können über **&OBST** erzeugt werden.

3.3 Eingabeparameter

Für das Pre-Processing der Brandsimulationsrechnung sollen Gebäudegeometrie, sowie Materialeigenschaften aus einem IFC-File in FDS übertragbar sein. Tabelle 1 listet die wichtigsten benötigten Eingabeparameter für die Berechnungen auf.

Tabelle 1: Eingabeparameter zum Erzeugen eines Wandelements in FDS

	Gruppe	Attribut	Verortung in IFC	Erklärung
MISC	Randbedingungen	TMPA	Pset_SpaceThermalRequirements	Temperatur
		HUMINITY	Pset_SpaceThermalRequirements	Luftfeuchtigkeit
OBST	Äußerer Wandaufbau	ID	IfcWallStandartCase	Bezeichnung
		XB(6)	IfcLocalPlacement IfcProductDefinitionShape	Lage Geometrie
SURF	Innerer Wandaufbau	ID	IfcMaterial	Bezeichnung
		MATL_ID(NL,NC)	IfcMaterialLayerSet IfcMaterialLayerSetUsage	Materialschichten
		THICKNESS(NL)	IfcMaterialLayer	Schichtdicke
	Brandeigenschaften	HRRPUA	Pset_MaterialFuel	Wärmefreisetzung
		IGNITION_TEMPERATURE	-	Zündtemperatur
MATL	Physikalische Eigenschaften	CONDUCTIVITY	Pset_MaterialThermal	Wärmeleitfähigkeit
		DENSITY	Pset_MaterialCommon	Wichte
		EMISSIONITY	Pset_MaterialOptical	Emmissionsgrad
		SPECIFIC_HEAT	Pset_MaterialThermal	Wärmekapazität
	Umwandlungsprozesse	HEAT_OF_COMBUSTION(:)	Pset_MaterialFuel	Verbr. Wärme
		HEAT_OF_REACTION(:)	-	Reaktionswärme
		NU_MATL(:,)	-	Hervorgehende Materialien
		NU_SPEC(:,)	Pset_MaterialCombusting	Hervorgehende Gase

4 Ausblick

Neben der Übertragung von Bauteil- bzw. Baustoffinformationen steht die Übertragung der Geometrie im Fokus einer Brandsimulationsrechnung, vor allem für Feldmodelle. Sind komplexe Geometrien mit einem Feldmodell abzubilden, so kommt mit der Modellierung der Geometrie ein wesentlicher Aspekt hinzu, da diese einen wesentlichen Einfluss auf das Strömungsbild sowie den Wärmeeintrag ins Bauteil hat. Hier steht im Allgemeinen die Frage im Raum, wie Geometrien für Brandsimulationen ausreichend genau aufgelöst werden müssen.

Der Datenstandart IFC stellt die benötigten Eingabeparameter des Pre-Processings weitestgehend zur Verfügung (vgl. Tabelle 1).

Geometriedaten können in IFC auf vielfältige Art angelegt werden. Probleme bereiten die von IFC abweichende Datenverarbeitung in den verwendeten Brandbemessungsprogrammen. Die gängigen Programme (z. B. ANSYS CFX, FDS) verfügen über keine programm-eigene IFC-Schnittstelle, eine vollständige Verarbeitung eines IFC-Modells ist daher zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich.

Informationen zu den Randbedingungen der Umgebungsatmosphäre können prinzipiell hinterlegt werden. Einzelnen Räumen (IfcSpace) kann mittels einer definierten Eingabegruppe Informationen zum Raumklima angehängt werden. Klimatische Angaben bezogen auf den Außenbereich können als Zahlenreihe an den Standort (IfcSite) angehängt werden, jedoch nicht in Form einer definierten Eingabegruppe.

Informationen über Materialeigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spez. Wärmekapazität können über IFC übermittelt werden. Bei Brandsimulationen können am Bauteil deutlich erhöhten Bauteiltemperaturen auftreten. Bei bestimmten Baustoffen (insbesondere Stahlbeton) sind Materialeigenschaften temperaturabhängig. Eine temperaturabhängige Definition der Materialkenngrößen wird von IFC derzeit nicht unterstützt.

Hinsichtlich der Brandeigenschaften von Materialien können einige Angaben wie etwa die Wärmefreisetzungsrate oder die Freisetzung von Verbrennungsgasen (N_2O , CO , CO_2) durch IFC übertragen werden. Der Informationsstand von IFC umfasst jedoch nicht alle Eingabeparameter für FDS. Umwandlungsprozesse von Materialien in Folge von Brandereignissen sind nicht in IFC aufgenommen.

Eine vollständige Automatisierung wird insbesondere für komplexe Brandszenarien nicht möglich sein, sodass eine BIM-gestützte Brandsimulation lediglich als Unterstützung für den Brandschutzingenieur eingesetzt werden kann.

5 Literatur

- SCHNEIDER, U. (2011), Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz – Grundlagen, Normung, Brandsimulationen, Materialdaten und Brandsicherheit. Renningen.
- LECHELER, S. (2014), Numerische Strömungsberechnung – Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele mit ANSYS 15.0. Wiesbaden.
- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C. & BEETZ, J. (2015), Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden.
- MAX, D. & DINKOV, I. (2017), Anwendungsbereiche und -grenzen von Ingenieurverfahren bei Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes – Teil 1: Grundlagen. Karlsruhe.
- DIMYADI, J. (2007), Generating FDS Simulation Input using IFC-based Building Information Model.
- MCGRATTAN, K., HOSTIKKA, S., MCDERMOTT, R., FLOYD, J., WEINSCHENK, C. & OVERHOLT, K. (2013), Fire Dynamics Simulator User's Guide.

Ansätze zur halbautomatischen Bestandsbrückenmodellierung

Andreas Ellinger

Institut für Bauinformatik · TU Dresden · Nürnberger Str. 31a · 01062 Dresden

E-Mail: andreas.ellinger@via-imc.com

Um die Datenmanagement-Methodik des Building Information Modelling auf das Erhaltungsmanagement bestehender Brückenbauwerke übertragen zu können, bedarf es zunächst eines objektorientierten 3D-Modells der jeweiligen Bauwerke.

Die händische Nachmodellierung bestehender Brücken mit konventionellen Methoden kann jedoch im Einzelfall einen unverhältnismäßig hohen Aufwand darstellen. Dieser Artikel beschreibt einen Ansatz, die Erstellung von Bestandsbrückenmodellen teilweise zu automatisieren und somit effizienter zu gestalten. Zu diesem Zweck werden Informationen aus 3D-Oberflächenscans als Input-Parameter an generische Bauwerksmodelle übergeben. Das Auslesen der maßgeblichen Parameter sowie die Übergabe an das generische Modell erfolgt dabei zunächst noch manuell. Die Anpassung des Geometriemodells an das konkrete Brückenbauwerk hingegen erfolgt automatisch.

Keywords: Bestandsmodellierung, Brücke, algorithmische Modellierung, Punktwolke, BIM

1 Einleitung

„Eine manuelle Nachmodellierung des sehr großen Brückenbestands [in Deutschland] muss als zu aufwändig eingeschätzt werden“ – zu dieser Einschätzung kam eine vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) in Auftrag gegebene Studie zur Anwendung von BIM im Infrastrukturbau (KÖNIG et al. 2016, 22).

Jedoch bieten objektorientierte Modelle auch im Asset- und Erhaltungsmanagement von Brückenbauwerken einen hohen potentiellen Mehrwert hinsichtlich der Möglichkeit zur eindeutigen, wiederverwertbaren und maschinenlesbaren Strukturierung von Zustandsinformationen (PETER et al. 2014).

In diesem Artikel wird ein Ansatz vorgestellt, das Erstellen der benötigten 3D-Brückenmodelle teilweise zu automatisieren und somit effizienter zu gestalten. Zu diesem Zweck werden generische objektorientierte Geometriemodelle erstellt, denen als Input Daten aus 3D-Oberflächenscans der zu modellierenden Bauwerke übergeben werden. Daraufhin passt sich das generische Modell an die abzubildende Brücke an. Die so erstellten Modelle sollen im ersten Schritt lediglich als „grafische Nutzeroberfläche“ dienen, um – z.B. im Rahmen von Schadenserfassungsmaßnahmen - Informationen eindeutig den einzelnen Bauteilen bzw. Modellobjekten zuweisen zu können. Das Ziel ist dabei nicht, ein geometrisch exaktes Abbild des Bestandsbauwerkes zu erzeugen. Sowohl der Detaillierungsgrad des Modells als auch der Anspruch an die geometrische Genauigkeit folgen dabei dem Prinzip "so genau wie nötig, so einfach wie möglich".

2 Bestandsmodellierung mit Hilfe von Oberflächenscans

Bei der Bestandsmodellierung mit Hilfe von Oberflächenscans dienen 3D-Punktwolken als Informationsgrundlage für die nachträgliche Modellierung eines bestehenden Bauwerks.

2.1 Auslesen der Parameter aus Punktwolken (manuell)

Abbildung 1 zeigt exemplarisch, wie aus einer Punktwolke händisch Bauteilabmessungen abgegriffen werden. Verwendet wurde hierzu das Planungs- und Vermessungsprogramm „OpenRoads“ von Bentley; die gezeigte Punktwolke wurde aus - mit Hilfe einer Drohne aufgenommenen - Luftbildern generiert. Gemessene Abstände, Krümmungen und Winkel beziehen sich dabei direkt auf einzelne Punkte der Punktwolke und können sowohl als tatsächliche Abmessungen im Raum als auch projiziert auf bestimmte Ebenen ausgegeben werden. Die Genauigkeit der so ermittelten Parameter hängt maßgeblich von Qualität und Auflösung der Oberflächenscandaten ab.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es neben dem manuellen „Vermessen“ der Punktwolke auch alternative Vorgehensweisen gibt. Eine Möglichkeit besteht beispielsweise darin, die Kanten und Eckpunkte der Punktwolke mit Hilfe geeigneter Programme automatisch erkennen zu lassen. Ihre jeweiligen Abmessungen können dann direkt abgegriffen werden; das manuelle Erstellen von Hilfslinien entfällt. Die Erkennung von Kanten in Punktwolken birgt jedoch noch eine Vielzahl von Problemen und wird im Rahmen dieses Artikels nicht weiter behandelt.

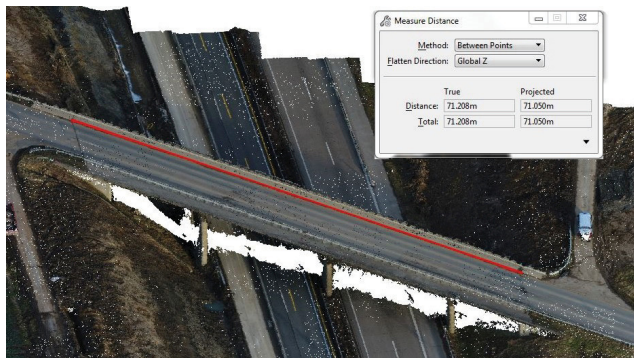


Abb. 1: Vermessung einer Punktwolke aus dem Oberflächenscan einer Autobahnüberführung; durchgeführt in Bentley OpenRoads

2.2 Probleme bei der Verwendung von Oberflächenscans als Vorlage für Bestandsmodelle

Bei der Verwendung von Oberflächenscans zur Erstellung von objektorientierten Bestandsmodellen besteht das Grundproblem darin, dass die beim Scan erzeugten Punktwolken keinerlei Informationen über die Objektstruktur, die Art der Objekte oder deren Eigenschaften sowie Beziehungen enthalten. Das 3D-Modell muss derzeit noch händisch nachmodelliert werden; die Punktwolke dient dabei in erster Linie dazu, die Lage von Kanten

und Eckpunkten im Raum zu ermitteln. Sie stellt eine Art "Umrisschablone" für das nachträglich erstellte Objektmodell dar. Die für ein semantisches, objektorientiertes Modell notwendigen Abgrenzungen, Gruppierungen, Eigenschaften und Beziehungen müssen jedes Mal aufs Neue innerhalb geeigneter BIM-CAD-Tools manuell definiert werden.

Darüber hinaus sind verdeckte, im Inneren des Bauwerks verlaufende Bauteilgrenzen ein generelles Problem, da Oberflächenscans keinerlei Informationen zu Vorhandensein, Form und Lage dieser Grenzen liefern. Im Modell können sie daher lediglich über - den Regeln der Technik folgenden - Annahmen definiert werden. (D.h. falls es nicht möglich ist, andere Informationsquellen wie beispielsweise Baupläne zurate zu ziehen.)

2.3 Automatische Bestandsmodellierung in anderen Fachbereichen

Die automatische Bestandsmodellierung mittels Daten aus Oberflächenscans ist in anderen Fachgebieten bereits kommerzielle Praxis. Im Anlagenbau beispielsweise ist die automatisierte Erstellung intelligenter 3D-Volumenkörper aus Punktwolken-Daten bereits weit entwickelt. Die jeweiligen Objekte werden aus der Punktwolke teilweise automatisch erkannt (KUBTI GMBH. o.D.).

In „abgeschwächter“ Form kommt halbautomatische Bestandsmodellierung auch im Hochbau bereits zum Einsatz. Eine auf dem Markt implementierte Variante dieses Konzepts ist beispielsweise die Übergabe von Informationen aus Punktwolken aus Kubit VirtuSurf an Autodesk Revit. Dabei werden einzelne Punkte aus der Punktwolke manuell ausgewählt und deren Koordinaten an das parametrische „Wand“-Werkzeug in Revit übergeben (BRAUNES 2014).

3 Generische Modelle

Der Begriff „generisches Modell“ bezeichnet im Rahmen dieser Arbeit die allgemeine Definition von Prozeduren, Regeln und Bedingungen zur Erstellung von Geometriemodellen in Form eines Algorithmus. Ein generisches Modell stellt somit implizit die Gesamtmenge aller durch den Modellierungs-Algorithmus abbildbaren Geometrieinstanzen dar. Ein wesentlicher Vorteil generischer Modelle besteht darin, dass bei der Erzeugung einer konkreten Instanz nur diejenigen Parameter explizit angegeben werden müssen, die von Instanz zu Instanz variieren können. Alle konstanten Parameter und Abhängigkeiten sind bereits im Algorithmus definiert und ergeben sich für die jeweiligen Modellinstanzen automatisch.

3.1 Parametrisches Modellieren

Parametrisches Modellieren bezeichnet eine Methode, bei der die geometrischen Parameter des modellierten Objekts nicht als fixe Werte, sondern als variable Parameter eingeführt werden, welche untereinander bestimmten Abhängigkeiten folgen. Basis des Geometriemodells ist in der Regel eine grafisch erstellte Grundskizze. Diese Methode ist in vielen CAD-Systemen schon seit Jahren etabliert.

Moderne CAD-Systeme stellen darüber hinaus spezielle „Werkzeuge“ bereit, in denen die Konstruktionsregeln bestimmter Objekttypen bereits fest verankert sind. Ein bekanntes

Beispiel hierfür wäre das „Wand“-Werkzeug aus Autodesk Revit. Diese Modellersysteme bieten die Möglichkeit, domain-spezifisches Wissen in Form von Regeln und Zwangsbedingungen im System zu verankern (LEE et al. 2005).

3.2 Algorithmisches Modellieren

Bei der algorithmischen Modellierung – auch Variantenprogrammierung genannt – werden alle zur Erzeugung der Geometrien notwendigen Schritte explizit in einem Algorithmus beschrieben, von der Definition der ersten Konstruktionsebene bis hin zu Booleschen Operationen zur Erzeugung von CSG-Körpern (Constructiv Solid Geometry). Im Gegensatz zu herkömmlicher parametrischer Modellierung bedarf diese Methode keiner grafischen Ausgangsskizze und kann über die Beschreibung mathematischer Beziehungen hinaus auch logische Bedingungen, Verzweigungen, Schleifen und rekursive Funktionen abbilden.

Nach Festlegung konkreter Werte für die freien Parameter erzeugt der Algorithmus als Output eine Modellinstanz. Diese wird von einem CAD-System eingelesen und als ein konkretes Geometriemodell dargestellt (KHABAZI 2012). Mehrere Softwareanwendungen bieten zu diesem Zweck visuelle Programmierumgebungen an (z.B. Dynamo, Grasshopper), die direkt mit einem 3D-Modellierungs-Tool verlinkt sind und so eine interaktive Modellierung erlauben (STAVRIC & MARINA 2011, 9).

4 Halbautomatische Bestandsbrückenmodellierung

Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, wie algorithmische Modellierung in Kombination mit aus Punktwolken ausgelesenen Parametern genutzt werden kann, um eine „halbautomatische“ Modellierung bestehender Brückenbauwerke zu ermöglichen.

4.1 Teilprozesse

Abbildung 2 zeigt schematisch die einzelnen Teilprozesse, wie sie bei der hier vorgestellten Methode durchlaufen werden.

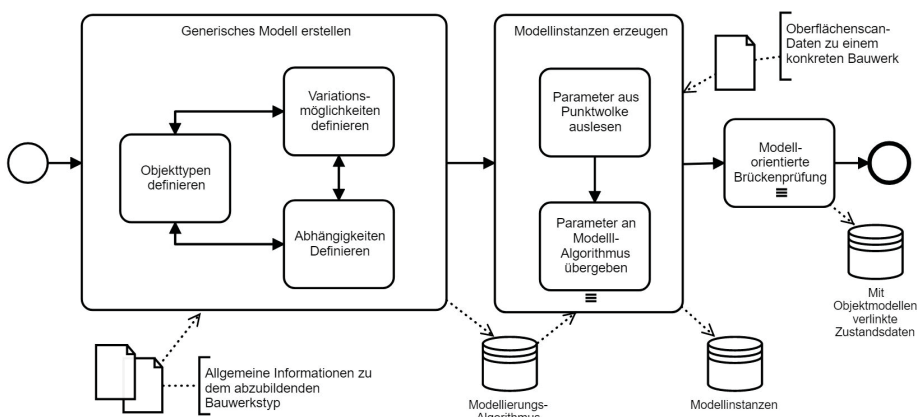


Abb. 2: Teilprozesse

Dargestellt sind die Erstellung des generischen Modells, die Instanziierung der konkreten Modelzustände sowie deren Verwendung bei der Brückenprüfung. (Die in „Business Process Model and Notation 2.0“ vorgeschriebenen Start- und End-Events wurden für die einzelnen Subprozesse der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt).

4.2 Prinzipielles Vorgehen und Beispielimplementierung

4.2.1 Erstellung des generischen Modells

Das hier vorgestellte Beispielmodell wurde mit Hilfe der in Rhinoceros 3D 6 standardmäßig integrierten visuellen Programmierung Grasshopper unter Einbindung von Python-Skripten erstellt. Grasshopper ermöglicht es, ohne Kenntnis herkömmlicher textbasierter Programmiersprachen, grafisch Modellierungsalgorithmen zu erstellen. Hierzu werden vordefinierte Funktionsblöcke (als Rechtecke dargestellt) über geschwungene Linien grafisch miteinander verbunden. Die Linien repräsentieren dabei den „Programmfluss“. Über sie werden den Funktionsblöcken Input-Werte zugewiesen sowie eventuelle Rückgabewerte an nachgeordnete Funktionsblöcke weitergeleitet. Wertebereiche sowie Datentypen numerischer Eingangs-Parameter werden in Form sogenannter „Number-Slider“ dargestellt.

Nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch, wie in Grasshopper mit geringem Aufwand ein und auf sehr intuitive Weise ein parametrischer Zylinder definiert werden kann.

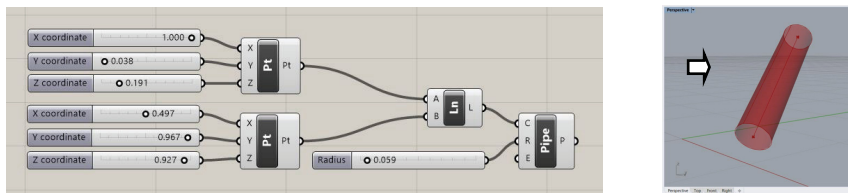


Abb. 3: Definition eines parametrischen Zylinders in Grasshopper (links) sowie dessen grafische Darstellung in Rhinoceros 3D (rechts)

Zusätzlich zu den bestehenden Funktionsblöcken können mittels sogenannter „Scripting-Komponenten“ eigene Funktionsblöcke definiert werden. Deren zugrundeliegender Programmcode wird dabei vom Nutzer selbst in Textform in einer der zur Verfügung stehenden Sprachen C#, Visual Basic oder Python erstellt.

Wesentliche Aspekte bei der Modellierung

Eine entscheidende Fragestellung bei der Entwicklung eines Modellierungsalgorithmus besteht in der gewünschten Variantenvielfalt der Modellinstanzen sowie in deren maximal möglichem Detaillierungsgrad.

Auf einer abstrakten Ebene lassen sich die Variationsmöglichkeiten, die ein generisches Modell besitzen kann, wie folgt zusammenfassen:

- Vorhandensein und Anzahl bestimmter Objekttypen

- Variation verschiedener Subtypen
- Form und absolute Abmessung konkreter Objekte
- Lage eines Objekts im Raum oder relativ zu anderen Objekten

Unabhängig von Art und Zweck der Modelle müssen im Modellierungsalgorithmus folgende Punkte festgelegt werden:

- Fixe Parameter
- Unabhängige variable Parameter (Freiheitsgrade)
- Wertebereiche der Freiheitsgrade (Datentyp, Intervallgrenzen)
- Abhängigkeiten zwischen Parametern

Die im Anwendungsbeispiel exemplarisch gewählten Variationsmöglichkeiten des Brückenmodell-Ausschnittes sind unter anderem:

- Querschnitt des Überbaus (Form, absolute Abmessungen)
- Trassierung des Überbaus (Position, Krümmung und Orientierung der Sekante durch Start- und Endpunkt)
- Anzahl und Position der Pfeiler sowie Pfeilertyp (kreisförmig, rechteckig)

Nachfolgende Abbildung zeigt zwei Instanzen des Beispielalgorithmus (auch als „Modelzustände“ bezeichnet).

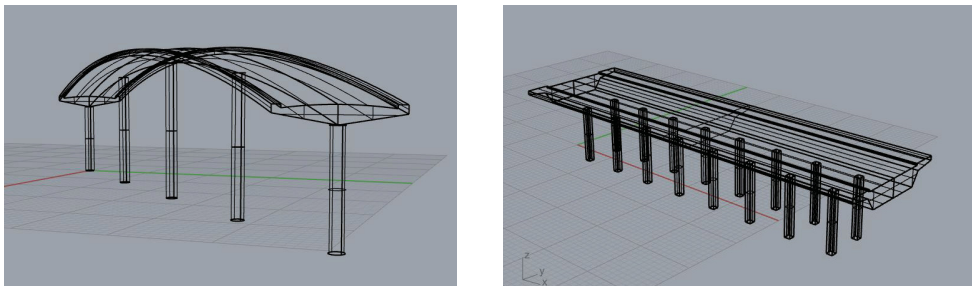


Abb. 4: Zwei Modellinstanzen des Beispiel-Algorithmus

4.2.2 Erzeugung einer Modellinstanz

Bei der Übergabe der Parameter an den Modellierungsalgorithmus können unterschiedliche Vorgehensweisen gewählt werden. Zum einen können die Parameter als alpha-numerische Werte explizit an die jeweiligen Variablen übergeben werden. Zum anderen können bestehende geometrische Körper wie z.B. Raumkurven in einer geeigneten CAD-Umgebung aus dem Algorithmus heraus referenziert werden.

Davon unabhängig können die Parameter entweder direkt in einer interaktiven Modellierungsumgebung wie Rhinoceros und Grasshopper festgelegt oder aber über eine separate Anwendung eingegeben werden. Welche Variante vorzuziehen ist, hängt vom Einzelfall ab. Einfache Parameter wie Länge, Anzahl oder Typ lassen sich in alpha-numerischer Form problemlos übergeben. Bei komplexeren Parametern wie z.B. einem Extrusions-Pfad entlang einer mehraxial gekrümmten Raumkurve ist unter Umständen die direkte Verlinkung

einer in einem CAD-Programm definierten Geometrie vorzuziehen. Die Referenzkurve kann dabei direkt über einzelne Punkte der als Vorlage dienenden Punktwolke erstellt werden.

Was die Frage der nativen vs. der externen Umgebung zur Parametereingabe angeht, so werden mit der Verwendung der jeweiligen interaktiven Modellierungsumgebung vertraute Nutzer es eventuell bevorzugen, die Eingabe direkt im System vorzunehmen. Anwender, die mit derartigen Anwendungen hingegen keine Erfahrung haben, werden vermutlich die Nutzung einer separaten, für die Parametereingabe speziell aufbereiteten Oberfläche, vorziehen.

Im Rahmen der Beispielimplementierung wurden die Parameter sowohl in Grasshopper direkt definiert als auch über in Rhinoceros 3D erzeugten Geometrien referenziert. Zudem wurden sie mit Hilfe von Python-Skripten mit externen CSV-Dateien verlinkt. Auf diese Weise konnte das generische Modell sowohl aus Microsoft Excel heraus als auch über eine mit Hilfe des Python-Moduls Tkinter erstellten Stand-Alone Anwendung mit grafischer Nutzeroberfläche gesteuert werden.

4.2.3 Anbindung der für die Zustandserfassung notwendigen Attribute

Auch die Verknüpfung der Bauteile und Bauteilgruppen mit den für eine Zustandserfassung nötigen Formularen kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Zum einen können die entsprechenden Attribute im selben Format angehängt werden, in dem auch das Geometriemodell beschrieben ist. Eine – der Open-BIM-Philosophie folgende – Möglichkeit bietet das IFC-Format. Es erlaubt sowohl die Beschreibung selbstdefinierter Bauteiltypen über die IFC-Proxy-Klasse als auch das Anhängen beliebiger Formulare in Form von IFC-Property-Sets. Zum anderen können die Formulare in einem vom CAD-Format unabhängigen Format beschrieben werden. Es muss lediglich ein Framework existieren, welches die externen Informationen mit den einzelnen CAD-Objekten verlinkt (FUCHS 2015). Bei der Beispielimplementierung wurde eine Attribuierung über IFC-Property-Sets gewählt. Die jeweiligen Felder wurden den Bauteiltypen exemplarisch in Rhinoceros 3D unter Verwendung des VisualARQ-Plug-Ins angehängt.

5 Ausblick

Der Fokus des hier vorgestellten Verfahrens liegt auf der Erzeugung von Bestandsbrückenmodellen mit dem Zweck der modellorientierten Dokumentation von Zustandsinformationen. Inwiefern sich die Methodik auf andere Modellzwecke zum einen und andere Bauwerkstypen zum anderen übertragen lässt, ist in Zukunft gesondert zu untersuchen.

Für geometrisch einfache Brückenbauwerke, die in ähnlicher Form in großer Zahl gebaut wurden, scheint die Methode durchaus vielversprechend. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die hier gezeigte „halbautomatische“ Vorgehensweise ab einer bestimmten Komplexität der Zielstellung an ihre Grenzen stößt.

Ein entscheidender begrenzender Faktor ist dabei voraussichtlich die Zahl der zur Instanziierung einer Modelvariante notwendigen Parameter. Diese hängt ab von der Komplexität der abzubildenden Bauwerke, den Genauigkeitsanforderungen an das Modell sowie der Standardisierbarkeit des jeweiligen Bauwerkstyps. So wird die Erstellung eines generischen

Modells vermutlich immer nur dann sinnvoll sein, wenn der abzubildende Bauwerkstyp in ähnlicher Form, d.h. mit überschaubaren Variationen in großer Zahl gebaut wurde. Für architektonisch unkonventionelle Einzelstücke wie beispielsweise Kunstmuseen scheint die Methode in der hier beschriebenen Form hingegen nicht geeignet.

Ein nächster denkbarer Schritt wäre der Übergang zur „vollautomatischen“ Bestandsmodellierung durch die Einbindung von automatischer Objekterkennung. Dabei würde ein Algorithmus die einzelnen Bauteile eines Bestandsbauwerkes sowie deren maßgeblichen geometrischen Parameter erkennen und selbstständig an ein generisches Modell übergeben. Da in diesem Szenario die manuelle Übergabe der Modellparameter entfallen würden, wären auch die oben genannten Anwendungsmöglichkeiten sowie deren Einschränkungen neu zu denken, da die Zahl der zu übergebenden Parameter keinen begrenzenden Faktor mehr darstellte.

Würde nun auch noch der Modellalgorithmus durch die Einbindung maschinellen Lernens stetig verbessert und selbstständig um weitere Bauteiltypen und Bauwerksstrukturen ergänzt, so wären den denkbaren Anwendungsmöglichkeiten nahezu keine Grenzen mehr gesetzt.

Literatur

- KÖNIG, M., AMANN, J., BORRMANN, A., BRAUN, M., ELIXMANN, R., ESCHENBRUCH, K., GOETZ, A., HAUSKNECHT, K., HOCHMUTH, M., LIEBICH, T., NEJATBAKSH, N., SCHEFFER, M. & SINGER, D. (2016), Wissenschaftliche Begleitung der BMVI Pilotprojekte zur Anwendung von BIM im Infrastrukturbau – Materialsammlung, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- LEE, G., SACKS, R. & EASTMAN, C. M. (2005), Specifying parametric building object behavior (BOB) for a building information modeling system. In: *Automation in Construction*, 15, 758 - 776.
- LOVE, P., MATTHEWS, J., SIMPSON, I., HILL, A. & OLATUNJI, O. (2013), A benefits realization management building information modelling framework for asset owners. In: *Automation in Construction*, 37, 1 - 10.
- FUCHS, S. (2015), Erschließung domänenübergreifender Informationsräume mit Multimodellen, Berichte des Instituts für Bauinformatik, Dresden, Heft 11, 41-55.
- KHABAZI, Z. (2012), Generativ Algorithms (using Grasshopper). www.labdigifab.files.wordpress.com/2014/03/generative-algorithms.pdf (12.06.2018).
- STAVRIC, M. & MARINA, O. (2011), Parametric Modeling for Advanced Architecture. In: *International journal of applied mathematics and informatics*, Issue 1, Volume 5, 9.
- BRAUNES, J. (2014), As-built BIM: Vom 3D Laserscan zum detaillierten Revit Model. www.au.autodesk.com/au-online/classes-on-demand/class-catalog/2014/revit-for-architects/169-ge#chapter=0 (02.06.2018).
- KUBTI GMBH (o.D.), Vom 3D-Laserscan zum CAD-Modell bestehender Industrieanlagen. www.skm-informatik.com/skm/fileadmin/user_upload/images/Download/Vortrag_kubiti.pdf (05.06.2018).

BIM für das Bestandsimmobilienmanagement

Raymond Wollenberg

Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme · RWTH Aachen
University · Mies-van-der-Rohe-Straße 1 · 52074 Aachen
E-Mail: raymond.wollenberg@gia.rwth-aachen.de

Im Rahmen eines Forschungsprojektes mit einer Immobilienkapitalgesellschaft wird erarbeitet, wie Building Information Modeling (BIM) als Grundlage für die Digitalisierung der Bestandsimmobilienverwaltung, insbesondere das Computer Aided Facility Management (CAFM), genutzt werden kann. Dafür werden die Ansätze aktueller Standards für BIM-Modell-Spezifikationen aufgearbeitet sowie Erfassungsmethoden aus dem Bereich des terrestrischen Laserscannings („Scan-to-BIM“) und BIM-ready Aufmaßwerkzeuge evaluiert. Das Ziel ist es, ein Rahmenwerk mittels anwendungsbezogener „Levels of Development“ zu schaffen, das als Kommunikationswerkzeug für das Definieren von Informationsanforderungen an BIM-Bestandsmodellen genutzt werden kann.

Keywords: BIM, LOD, As-built, Scan-to-BIM, IFC, CAFM

1 Einleitung

Ein zentraler Bestandteil der Digitalisierung in der Bauwirtschaft ist das Building Information Modeling (BIM). Mittels der Methode BIM sollen digitale Bauwerksinformationen über den gesamten Bauwerkslebenszyklus verwaltet werden. Interoperabilität wird durch möglichst offene Datenaustauschstandards (z. B. die Industry Foundation Classes, IFC) erreicht. Die längste Phase eines Bauwerkslebenszyklus ist der Betrieb. Ein wesentlicher Teil des Betriebs ist das (computergestützte) Facility Management. CAFM-Systeme verwalten Bauwerksdaten im Hinblick auf das Management von technischer Gebäudeausstattung, Inventar, Flächen, Verträgen, Energie und weiteren Aufgaben, die Zugang, Kontrolle und Pflege von Daten erfordern (MAY 2013). Um hohe Aufwendungen für eine manuelle Dateneingabe zu umgehen, kann die IFC-Schnittstelle eines BIM-Modells für automatisierte Datenmigration genutzt werden (MATĚJKA et al. 2016). Für die Gewährleistung der Effektivität dieses BIM-to-CAFM-Workflows ist eine anwendungsbezogene Erfassung und Verarbeitung der benötigten Daten erforderlich. Da CAFM eine große Spannweite an Anwendungsmöglichkeiten zur Verfügung stellt, soll ein System zur Spezifikation von BIM-Bestandsmodellen entwickelt werden. So wird eine eindeutige Identifikation der notwendigen Informationen sichergestellt. Für Bestandsimmobilien sind häufig keine konsistenten und durchgängigen digitalen as-built-Informationen verfügbar, sodass hier eine anwendungsbezogene Evaluierung unterschiedlicher Erfassungstechniken zweckdienlich ist.

2 Definition der Informationsanforderungen

Für die Spezifikation von BIM-Modellen in der Planungsphase können sogenannte „Levels of Development“ (LOD) verwendet werden. Das LOD definiert den Fertigstellungsgrad, der Klarheit über den notwendigen Informationsgehalt von BIM-Modellen unter den Beteiligten

in den einzelnen Planungsphasen schaffen soll. Aufgrund der heterogenen Informationsanforderungen von unterschiedlichen Anwendungen in der Immobilienverwaltung und der Gegebenheit, dass es sich nicht um eine As-planned, sondern um eine As-built-Dokumentation handelt, müssen zunächst Dokumentationsgrade (Level of as-built Documentation, LOAD) für As-built-BIM-Modelle definiert werden.

2.1 Vorhandene Standards

Verschiedene Institutionen haben bereits Konzepte publiziert, mit denen die inhaltliche und geometrische Detailtiefe von BIM-Modellen standardisiert spezifiziert werden können. Das British Standards Institute (BSI) veröffentlichte beispielsweise seine Spezifikationen für BIM-Modelle 2013 mit der Public Available Specification (PAS) 1192-2:2013 (“Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling”). Im Mittelpunkt steht hier ein Informationsübergabe-Kreislauf, der ein BIM-Projekt von der Entwurfsphase bis hin zum Betrieb mit Spezifikationen von Inhalten und Verantwortlichkeiten unterstützt. Teil des Dokuments sind unter anderem „Levels of model detail and model information“ (vgl. ab Kapitel 9.8 PAS 1192-2:2013). Hier werden benötigte Inhalte von BIM-Modellen in den unterschiedlichen Planungs- und Bauphasen definiert. Bauteilspezifische Definitionen bleiben jedoch aus, da die Informationsanforderungen gesamtmodellorientiert sind. Für die Anforderungen an graphische Inhalte und Geometrien werden beispielsweise nur wenige Abbildungen mit geringer Informationstiefe zur Verfügung gestellt.




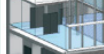
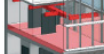
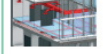
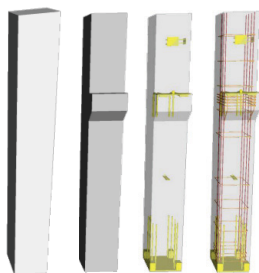
Stage number	1	2	3	4	5	6	7
Model name	Brief	Concept	Definition	Design	Build and commission	Handover and closeout	Operation
Systems to be covered	N/A	All	All	All	All	All	All
Graphical illustration (building project)							

Abb. 1: Levels of model definition for building and infrastructure projects, PAS 1192-2:2013 (Auszug), (THE BRITISH STANDARDS INSTITUTE 2013)

Einen bauteilorientierten Ansatz wählt das BIMforum, die US-amerikanische Abteilung von buildingSMART. Mit dem „Level of Development Specification Guide“ wurde im November 2017 die aktuellste Version der BIM-Spezifikationen veröffentlicht (BIMFORUM 2017). Ziel des BIMforum ist es, mit ihrem sechsstufigen System Planungsteams ein Kommunikationswerkzeug an die Hand zu geben, welches das kollaborative Arbeiten mit BIM erleichtert und mit dessen Hilfe Modellinhalte auf Basis eines Katalogs definiert werden können. Der „Level of Development Specification Guide“ formuliert mit hoher Detailtiefe Definitionen für die graphische Ausarbeitung, jedoch werden selten Informationsanforderungen definiert, die sich auf im BIM-Fokus stehende Aspekte wie Semantik und beschreibende Attribute konzentrieren. Als Beispiel soll ein Auszug aus dem Katalog dienen (Abbildung 2).

**Abb. 2:**

LOD 200, LOD 300, LOD 350, LOD 400 (von links nach rechts), Precast Structural Column (Concrete), Level of Development Specification Guide, (BIMFORUM 2017)





Für das LOD 100 einer Stütze existieren keine graphischen Spezifikationen. Das LOD 200 verlangt eine grobe Repräsentation der Geometrien einer Stütze. Das LOD 350 ist ein Zwischenlevel zwischen LOD 300 und LOD 400. Auf der einen Seite besitzt es nicht die grafische Detailtiefe wie das LOD 400, das den höchsten Planungsdetailgrad enthält und somit Ausführungsplanqualitäten liefert. Jedoch bietet es mehr Informationen als das LOD 300, das sich hauptsächlich auf die geometrische Repräsentation der Stütze konzentriert. Ziel des LOD 350 ist es, Anforderungen an Schnittstellen zu anderen Bauteilen zu definieren. Es gibt im gesamten Bauteilkatalog keine bauelementspezifischen Ausführungen zum höchsten Level, dem LOD 500. Es wird nur der allgemeine Hinweis formuliert, dass es sich um eine Überprüfung des Bauzustandes hinsichtlich Größe, Form, Position, Menge und Orientierung handelt und das nicht-grafische Informationen angehängt werden können.

2.2 BIM-Spezifikationen für Bestandsimmobilien

Sowohl der projektorientierte vom BSI als auch der bauteilorientierte Ansatz vom BIMforum sind somit planungsorientiert. Diese Systeme lassen sich jedoch auf Grund der divergierenden Informationsgrundlagen nicht ohne weiteres auf die Bestandsmodellierung übertragen. Im Planungsfall steigt der Fertigstellungsgrad des Modells (Level of Development, LOD) während der Leistungsphasen, da sich die Informationsgrundlage zu Geometrien (Level of Geometry, LOG) und Informationen (Level of Information, LOI) immer weiter verdichtet. Im Gegensatz dazu geht es in der Bestandsmodellierung darum, Informationen eines Dokumentationsgrades (Level of as-built documentation, LOAD) auf Basis anwendungsrelevanter Bestandsgeometrien (Level of as-built geometry, LOAG, Tabelle 1) und Bestandsinformationen (Level of as-built information, LOAI) herauszufiltern. Im Folgenden soll nun ein Konzept für diesen Vorgang vorgestellt werden. Ziel ist es, Inhalte für Anwendungsmodelle zu definieren. Hierbei dienen die LOADs als Kommunikationsbasis mit dem Auftraggeber. Dafür wurden Aspekte aus den bestehenden BIM-Spezifikationen aufgegriffen und weiterentwickelt.

Für die Einteilung der Geometrien werden im vorliegenden Fall vier Stufen angelegt. Dabei sind folgende Deklarationen das Ziel: LOAG10 soll die einfachste Darstellung des Bauteils anbieten. In der Regel sind sie ein- oder zweidimensional. Das LOAG10 für Wände sieht beispielsweise eine Darstellung als 2D-Fläche vor. Das LOAG20 soll den Begrenzungsbereich des Bauteils abbilden. Das LOAG30 geht weiter ins geometrische Detail. Für eine möglichst genaue und detailreiche Darstellung soll das LOAG40 dienen. Somit kann der Auftraggeber bei der Wahl des LOAG auch berücksichtigen, dass ein höheres LOAG in der Regel mehr Modellierungskosten verursacht. Als Beispiel dafür ein Ausschnitt aus dem entstandenen Katalog für das Bauelement Stütze.

Tabelle 1: Level of As-built Geometry, Stütze

LOAG10	LOAG20	LOAG30	LOAG40
			
2D-Darstellung als Linie mit Ursprung im Schwerpunkt des Querschnitts	Querschnitt: Auswahl aus rechteckig und rund, bei daraus folgender Verallgemeinerung soll der Querschnitt die maximalen Abmessungen der Stütze repräsentieren	Querschnitt: Wahre Form des Grundrisses inkl. Oberflächenstrukturen oder Ornamente, Querschnitt ist über die gesamte Höhe konstant	Querschnitt: Wahre Form des Grundrisses inkl. Oberflächenstrukturen oder Ornamente, Querschnitt kann sich über die Höhe verändern

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil von BIM ist die Attribuierung von Modellinhalten. Stellvertretend hierfür steht das LOAI. Das LOAI folgt keiner hierarchischen Struktur, sondern wird anwendungsspezifisch festgelegt. Für das LOAI gilt, dass es besonders wichtig ist, nur die Informationen zu hinterlegen, die für die spätere Nutzung relevant sind, um den Aufwand der Erfassung, Modellierung und Pflege der Daten möglichst gering zu halten. Im Projekt wurden vorerst die Anwendungen Bauplanung, Vermarktung und Facility Management erarbeitet. Das Ziel ist es, anwendungsspezifische LOAIs zu erarbeiten, die als Grundlage für den Dialog der einzelnen Parteien dienen. Dazu soll der projektspezifische Entwurf des LOAI für die Anwendung Facility Management (LOAI FM) in 2.4 vorgestellt werden.

Nach der Definition der geometrischen und semantischen Inhalte des Modells, ist es notwendig die Genauigkeit des Modells festzulegen. Dazu dient das Level of Accuracy (LOA), das die Toleranz für geometrische Abweichungen zwischen Realität und Modell angibt. In diesem Projekt werden dafür die Genauigkeitseinstufungen des U.S. Institute of Building Documentation (USIBD), die sich an der DIN 18710-1 für Ingenieurvermessung orientieren, verwendet (Tabelle 2).

Tabelle 2: Level of Accuracy, (U.S. INSTITUTE OF BUILDING DOCUMENTATION 2016)

Level	Upper Range	Lower Range
LOA10	User defined	5 cm*
LOA20	5 cm*	15 mm*
LOA30	15 mm*	5 mm*
LOA40	5 mm*	1 mm*
LOA50	1 mm*	0 *

* Specified at the 95 percent confidence level.

Auf Grundlage der LOAs ist es nun möglich, bauteilspezifisch oder für das Gesamtprojekt ein Genauigkeitslevel auf normgerechter Basis mit allen Beteiligten zu vereinbaren.

2.4 BIM-Spezifikationen für Facility Management

Die wesentliche Funktionalität des LOAI FM soll der Export des BIM-Modells in eine CAFM-Software sein. Da BIM Software und CAFM Software programmintern unterschiedliche Bezeichnungen und Klassifizierungen für Elemente und Attribute verwenden können, ist es notwendig auf standardisierte Kataloge für die Bezeichnung zurückzugreifen, um ein Mapping vorzunehmen, das die Bezeichnungen übersetzt bzw. zuordnet. Für die Bauteilklassifizierung und Attribuierung wird im vorliegenden Fall das „CAFM-Connect 3.0“ BIM Profil gewählt. Die Initiative der Immobilienbranche „CAFM-Connect“¹ treibt einen einheitlichen und offenen Datenstandard auf IFC Basis voran. Die BIM-Profile bestehen zum einen Teil aus der Bauteilklassifizierung, die sich im Falle des CAFM-Connect 3.0 BIM Profil an der GEFMA 924-2 orientiert und einer Attribuierung, die auf IFC basiert. Die German Facility Management Association (GEFMA e.V.)² engagiert sich unter anderem in der Normungsarbeit für FM. Mit der GEFMA 924-2 wurde die Gliederungssystematik der DIN 276-1 „Kosten im Bauwesen“ übernommen, um zwei weitere Gliederungsebenen erweitert und mit aus anderen Richtlinien referenzierte Elemente ergänzt. Somit stellt das CAFM-Connect 3.0 BIM Profil einen Katalog dar, dessen Klassifizierungssystem sich auf eine in Deutschland geltende Industrienorm gründet und dessen IFC-Attribuierung von einer großen Gemeinschaft von CAFM Anwendern festgelegt wurden.

Die IFC-Attribuierung des BIM-Profiles konzentriert sich hauptsächlich auf geometrische und technische Attribute, wie zum Beispiel Wandstärke oder Nennleistungen von elektrischen Motoren, wartungsprozessorientierte Attribute für Garantie oder Herstellerangaben werden nicht berücksichtigt. Um diesen Bereich im LOAI FM Katalog mit zu berücksichtigen, wird der Katalog zusätzlich um Attribute des Datenaustauschstandards Construction-Operations Building information exchange (COBie)³ erweitert. COBie persistiert standortbezogene Informationen, kombiniert mit Daten zu Modell, Seriennummer, Installationsdatum, Garantie und Wartung. Außerdem werden Kontaktinformationen vom Planer bis hin zum Installateur mit Bezug zum jeweiligen Element hinterlegt. Die Verschmelzung aus dem CAFM-Connect 3.0 BIM Profil und COBie wird im Projekt als Basiskatalog gewählt, um die Erstellung eines BIM-Modells eines existierenden Gebäudes in Zusammenarbeit mit Anwendern vorzubereiten. Im nächsten Schritt müssen diese Informationen aufgenommen werden, dazu werden im folgenden Kapitel unterschiedliche Erfassungs- und Modellierungstechniken vorgestellt und evaluiert.

3 Erfassungstechniken

Zur Erfassung der geometrischen und teilweise semantischen Daten von Bestandsimmobilien können unterschiedliche Techniken verwendet werden. Damit die Art des Aufmaßes möglichst gut auf die Anwendungsanforderungen abgestimmt ist, werden verschiedene state-of-the-art Systeme aus den Bereichen terrestrisches Laserscanning (TLS), mobiles Laserscanning (MLS) und BIM-ready Aufmaßwerkzeug verglichen werden. Diese untersuchten Systeme werden im Folgenden vorgestellt.

¹ <http://www.cafm-connect.org/>


² <https://www.gefma.de/>

³ https://www.nibs.org/?page=bsa_cobie

3.1 Terrestrisches Laserscanning (TLS)

Ein Beispiel eines aktuellen Laserscanners für das Gebäudeaufmaß ist das Instrument „BLK360“ (LEICA GEOSYSTEMS AG 2017) von Leica, ein terrestrischer Low-cost Laserscanner.

Tabelle 3: Technische Details BLK360 (LEICA GEOSYSTEMS AG 2017)


Abbildung	Technische Details	
	Abmessung (B x T x H)	100 mm x 100 mm x 165 mm
	Gewicht	1 kg
	3D-Punkt Genauigkeit (1σ)	6 mm auf 10 m, 8 mm auf 20 m
	Scandauer (10 mm Auflösung 10 m)	1:50 min
	Aufnahmedauer Panoramafoto	1:40 min
	Maximale Reichweite	60 m
	Lebensdauer Batterie	> 40 Scans
	Preis	< 20.000 €

Der Scanner ist im Vergleich zu konventionellen terrestrischen Laserscanner sehr kompakt. Bei der Entwicklung wurde Wert auf eine einfache Bedienung gelegt. Einstellungen und Zusammenfügen der einzelnen Scans werden durch eine Softwareapplikation (ReCap Pro) auf einem Apple iPad Pro unterstützt. Das Zusammenfügen der Scans, die sogenannte Registrierung, ist ein halbautomatischer softwaregestützter Prozess, in dem die einzelnen Scans erst manuell grob zueinander orientiert werden. Im Nachgang werden von der Software mittels statistischer Analyseverfahren die Abstände der sich überschneidenden Flächen minimiert und die Scans somit feinregistriert werden. Der Vorteil der Softwareapplikation ist es, dass die Scans registriert werden können während der Scanner Punktwolken und 360° Panoramafotos erfasst. Wenn die Scans sich ausreichend überschneiden, kann dies automatisch geschehen oder manuell mit der Auswahl von drei identischen Punkten oder Vermessungsmarken vorgenommen werden. Die Tabelle 3 enthält eine Übersicht zu den technischen Details.

3.2 Mobiles Laserscanning (MLS)

Ein aktuelles Beispiel eines mobilen Laserscanners ist das System „ZEB-REVO RT“ (GEOSLAM 2018). Hierbei handelt es sich um eine Kombination eines Handheld Scanners mit einer Prozessierungseinheit. Mobiles Laserscanning (MLS) zeichnet sich dadurch aus, dass auf feste Instrumentenstandpunkte beim Scannen verzichtet werden kann.

Tabelle 4: Technische Details ZEB-REVO RT (GEOSLAM 2018)

Abbildung	Technische Details	
	Gewicht	Scanner 1,0 kg; Rechner 1,7 kg
	Relative Genauigkeit	10 bis 30 mm
	Absolute Positionsgenauigkeit	30 bis 300 mm
	Lebensdauer Batterie	1,5 h, 3.000 m bis 9.000 m Vermessungsdistanz (GEOSLAM 2017)
	Maximale Reichweite	30 m
	Preis	< 30.000 €


Mit Hilfe von Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) ist es möglich, die gleichzeitige Bestimmung der Position und die Erfassung der Umgebung in Echtzeit durchzuführen und somit in der Bewegung kontinuierlich zu scannen. Der SLAM-Prozess besteht aus einem sich wiederholenden Ablauf mit mehreren Schritten, in denen Referenzobjekte extrahiert, Messungen den Referenzobjekten zugeordnet, Posen geschätzt und diese Referenzobjekte und Posen aktualisiert werden (RIISGAARD & BLAS 2004). Daher kann der ZEB-REVO RT innerhalb von wenigen Sekunden Gebäudegeometrien zu erfassen. Auch eine Registrierung der Punktwolken entfällt, da dies durch SLAM während des Scans automatisiert geschieht. Die Real Time (RT)-Version bietet zusätzlich die Möglichkeit browserbasiert in Echtzeit den Grundriss des Scans zu visualisieren und zu überprüfen. Nachteilig ist jedoch, dass der die Erfassungsgeschwindigkeit des ZEB-REVO RT sich stark verringert, wenn ein Kamerasystem verwendet wird, mit dem Bildmaterial erfasst und die Punktwolke eingefärbt werden kann. In Tabelle 4 findet sich eine Übersicht der technischen Details.

3.3 BIM-ready Aufmaßwerkzeuge

Alternativ zu Scannern, können Einzelpunkt-basierte Aufmaßsysteme verwendet werden. Der „Flexijet 3D“⁴ ist ein derartiges mobiles 3D-Aufmaßsystem. Das Messprinzip ist vergleichbar mit den Funktionalitäten eines Tachymeters, da auch hier Horizontal- und Vertikalwinkel, sowie Distanzen ermittelt werden. Durch eine Verbindung zu CAD-Software auf einem Notebook lassen sich Gebäudegeometrien direkt vor Ort mit dem Flexijet 3D konstruieren. Im Vergleich zum Laserscannen, bei dem Punktwolken erfasst werden, handelt es sich hierbei um ein digitales Einzelpunktaufmaß, aus dem Geometrien direkt abgeleitet werden. Der Flexijet 3D besitzt unter anderem eine Schnittstelle zu der hauseigenen CAD-Software „FlexiCAD“. Die meisten Funktionalitäten des Flexijet 3D sind auf ein schnelles Handwerkermaß mit der FlexiCAD Software ausgelegt. Typische Anwendungen dabei sind Aufmaße für Einbauküchen, Treppen, Fenster etc. Außerdem besitzt der Flexijet 3D eine Schnittstelle zu der BIM-Software Autodesk Revit. Somit ist möglich, ein BIM-Modell vor Ort zu erstellen. Daher wird der Flexijet 3D im Kontext des Forschungsprojekts der Kategorie „BIM-ready Aufmaßwerkzeug“ zugeordnet. In der folgenden Tabelle findet sich eine Übersicht der technischen Details.

⁴ <https://www.flexijet.info/produkte/flexijet-3d-die-neue-generation/>

Tabelle 4: Technische Details Flexijet 3D (neue Generation)

Abbildung	Technische Details	
	Abmessungen (B x T x H)	370 x 180 x 180 mm
	Gewicht	5 kg
	Maximal Reichweite	100 m
	Standardabweichung Distanz	~ 0,5 mm
	Winkelgenauigkeit des Drehgebers	3''
	Lebensdauer Batterie	max. 8 h

3.4 Vergleich

Um zu verstehen, welche Erfassungs- und Modellierungstechnik am besten zu der späteren Anwendung des BIM-Modells passt, sollen im Folgenden die unterschiedlichen Erfassungsmethoden miteinander verglichen werden. Dabei werden die Kategorien geometrische Auflösung und Genauigkeit, Zeitaufwand und Möglichkeiten zur Erfassung der Semantik unterschieden.

Ein wesentlicher Unterschied in den Erfassungsmethoden liegt in der geometrischen Auflösung der Messpunkte. Während TLS und MLS Punktwolken hoher räumlicher Auflösung liefern, werden beim BIM-ready-Aufmaßwerkzeug diskrete Einzelpunkte erfasst. Das hier vorgestellte TLS liefert zudem Bilddaten zur Einfärbung der Punktwolke, welche die Modellierung insbesondere der Semantik (z.B. Art des Materials) visuell unterstützen. Die höhere Auflösung der Punktwolken des TLS ermöglicht zudem eine detailliertere Modellierung. Die Aufnahme diskreter Einzelpunkte beim BIM-ready-Aufmaßwerkzeug und der zugehörigen Software bietet gegenüber den Massenverfahren den Vorteil, dass die Modellierung (inklusive der Semantik) unmittelbar vor Ort und angesichts der Aufnahmeobjekte erfolgen kann und erspart die aufwändige Modellierung im Postprocessing. Damit stehen allerdings in der Regel ohne eine erneute Ortsbegehung keine Daten für eine nachträgliche Modellierung zur Verfügung. Zum anderen unterscheiden sich die Erfassungsmethoden in ihrer geometrischen Genauigkeit. Der BLK360 liegt in der Genauigkeitsklasse des LOA30. Im Rahmen eines Vergleichstests mit einem High-End Laserscanner (Riegl VZ-400) konnten die Genauigkeiten verifiziert werden. Ein Test des ZEB-REVO RT steht noch aus. Die technischen Daten weisen darauf hin, dass die relativen Genauigkeiten im Bereich des LOA20 und die absoluten Genauigkeiten im Bereich des LOA10 liegen. Das bedeutet, dass ein Raum lokal betrachtet mit LOA20 modelliert werden kann, die Referenzierung des Raumes innerhalb eines Gebäudes aber vermutlich lediglich im Genauigkeitsbereich LOA10 liegt. Unter den drei verglichenen Geräten wird für den Flexijet 3D seitens des Herstellers die größte Genauigkeit versprochen. Die Verifizierung steht noch aus. Letzter, ökonomisch nicht unwichtiger Vergleichsfaktor ist der Zeitaufwand für Erfassung und Modellierung. Während TLS und MLS durch den Verzicht auf Modellierung im Zuge der Datenerfassung vor Ort um ein vielfaches schneller ist als das BIM-ready-Aufmaßwerkzeug, gewinnt letzteres Verfahren durch die im Postprocessing nicht mehr erforderliche Modellierung. Durch die SLAM-Technik ist die Datenerfassung beim MLS zudem schneller als beim TLS.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Vorgestellt wurden sowohl Systeme zur Erfassung von Bestandsimmobilien mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen als auch eine LOAD-Systematik für verwendungszweckabhängige Anforderungen an die benötigten geometrischen und semantischen Informationen eines BIM-Modells. Der Zweck für die Entwicklung des LOAD-Systems liegt darin, dieses als Grundlage für die multilaterale Kommunikation von Informationsanforderungen zwischen den einzelnen Beteiligten im Immobilienmanagement (Vermieter, Mieter Facility Manager etc.) zu verwenden.

Im Rahmen eines Beispielprojektes soll nun einerseits untersucht werden, ob die entwickelten LOAG- und LOAI-Kataloge, bestehend aus geometrischen Modellierungsvorgaben, CO-Bie- und CAFM-Connect-Attributen, die Anforderungen erfüllen können. Andererseits sollen die vorgestellten Verfahren zur Bestandserfassung im Hinblick auf ihre Eignung für die verschiedenen Stufen des LOAD-Systems betrachtet werden. Das beinhaltet neben der geometrischen und semantischen Detailliertheit und Genauigkeit selbstverständlich auch die notwendigen Zeitaufwände in der Erfassung und Modellierung der einzelnen Verfahren.

Literatur

- BIMFORUM (2017-11): LOD Spec 2017 Part I. For Building Information Models.
- GEOSLAM (2017): ZEB-REVO RT User Guide. V1-0-2. 80 pp.
- GEOSLAM (2018): Geoslam ZEB-REVO RT Solution. https://geoslam.com/wp-content/uploads/2018/04/GeoSLAM-ZEB-REVO-RT-Solution_v4.pdf?x75450 (08.05.2018).
- LEICA GEOSYSTEMS AG (2017): Leica BLK360 User Manual. 1.0. Aufl. Schweiz. 36 pp.
- MATĚJKA, P., KOSINA, V., TOMEK, A., TOMEK, R., BERKA, V. & ŠULC, D. (2016): The Integration of BIM in Later Project Life Cycle Phases in Unprepared Environment from FM Perspective. – *Procedia Engineering* 164: 550–557.
- MAY, M. (2013): CAFM-Handbuch. IT im Facility Management erfolgreich einsetzen. – Springer Vieweg. 504 pp.
- RIISGAARD, S. & BLAS, M. R. (2004): SLAM for Dummies. A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping. https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-412j-cognitive-robotics-spring-2005/projects/1aslam_blas_repo.pdf (08.05.2018).
- THE BRITISH STANDARDS INSTITUTION (2013-03): Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling. 1. Aufl. 91.010.01 (1192-2:2013).
- U.S. INSTITUTE OF BUILDING DOCUMENTATION (2016): USIBD Level of Accuracy (LOA) Specification Guide. Guide for USIBD Document C220TM: Level of Accuracy (LOA) Specification for Building Documentation. 2.0. Aufl. (C120).

Session 2:

Simulation und Modellierung 2

Methode zur automatisierten Verortung von Inspektionsdaten aus bildbasierten Bauwerksprüfungen

Jakob Taraben¹ und Marcel Helmrich²

¹Professur Modellierung und Simulation – Konstruktion · Bauhaus-Universität Weimar
Marienstraße 13 · 99423 Weimar · E-Mail: jakob.taraben@uni-weimar.de

²Professur Modellierung und Simulation – Konstruktion · Bauhaus-Universität Weimar
Marienstraße 13 · 99423 Weimar · E-Mail: marcel.helmrich@uni-weimar.de

Für die Instandhaltung und Sanierung von Infrastrukturbauwerken sind regelmäßige Inspektionen von großer Bedeutung. Sie sorgen für die frühzeitige Erkennung von Schäden und unterstützen gezielt präventive Maßnahmen. Bestandteil solcher Inspektionen ist die visuelle Bauwerksprüfung, welche mit großem Arbeits- und Kostenaufwand sowie Sicherheitsrisiken verbunden ist. Durch den Einsatz von mit Foto- oder Thermographiekameras ausgerüsteten Fluggeräten kann der Aufwand erheblich verringert werden. Die Anwendung dieser Systeme erzeugt eine große Menge an hochaufgelösten Bilddaten, aus denen mithilfe photogrammetrischer Methoden dichte, georeferenzierte Punktwolken errechnet werden. Das vorgestellte Verfahren beschreibt die Verortung und Aufbereitung solcher Inspektionsdaten in Bauwerksmodellen zur weiteren Bewertung, indem geometrische Informationen der Punktwolke und detektierte Anomalien aus Bildern mechanisch interpretiert und in entsprechenden Simulationsmodellen verwendet werden. Während der Inspektion festgestellte Schäden oder Anomalien finden auf diese Weise direkt Eingang in den Prozess von Berechnungen und Simulationen und erlauben so ein präziseres Abbild des Ist-Zustandes.

Keywords: UAS, Bauwerksinspektion, FEM Kalibrierung

1 Einleitung

Die Instandhaltung von Infrastrukturbauwerken verlangt regelmäßige und gründliche Inspektionen. Dadurch können Prozesse der Schadensbildung in frühen Stadien erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen getroffen werden. Inspektionsintervall, Umfang und Hilfsmittel der überwiegend visuellen Inspektionen sind in Deutschland in Richtlinien und Normen festgelegt (zum Beispiel DIN 1076 für Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen oder Ril 804 für Eisenbahnbrücken). Schwer zu erreichende Stellen, welche gerade an Bauwerken großer Höhe auftreten erfordern speziell geschultes Personal, kostspielige Technik und hohen zeitlichen Aufwand. Zur Unterstützung solcher Arbeiten können Unbemannte Flugsysteme, sogenannte Unmanned Aircraft Systems (UAS), eingesetzt werden, welche ausgerüstet mit Foto- oder Thermographiekameras hochaufgelöste Bilder des Bauwerks aufnehmen (MORGENTHAU & HALLERMANN 2016). Die entstandenen Bilddaten werden als Grundlage für Verfahren zur Identifikation visueller Anomalien, wie beispielsweise der automatischen Risserkennung (SIRONI et al. 2016) genutzt, wodurch das Bild durch zusätzliche Informationen angereichert wird. Diese dienen als Hilfestellung zur Bewertung des Bauwerkszustandes. Weiterhin können die Bilder aus Befliegungen mit UAS zur photogrammetrischen Rekonstruktion von 3D-Punktwolken verwendet werden (SCHÖNBERGER & FRAHM 2016) und dienen auf diese Weise als Abbild des geometrischen Ist-Zustandes. Zusätzlich zur 3D-Punktwolke werden während des Rekonstruktionsverfahrens

rens die Kamerapositionen und -orientierungen ermittelt. Besonders bei nicht oder nicht ausreichend dokumentierten Bestandsbauwerken stellt die Extraktion von Bauteilgeometrien aus Punktwolken eine effektive Methode zur digitalen Modellierung dar. WALSH et al. (2013) beschreibt eine Vorgehensweise zur Segmentierung und Objekterkennung in unsortierten Punktwolken, welche auf einem Vergleich benachbarter Punkte basiert. Für dichte Punktwolken großer Bauteile ist der Rechenaufwand jedoch sehr hoch, wodurch die Methode in diesem Fall nur teilweise anwendbar ist. Ein weiterer Ansatz ist die Annäherung der Bauteilgeometrie auf Querschnittsebene durch Spline-Kurven (DIMITROV et al. 2016), was gerade für die vorwiegend eindimensionalen Bauteile in Brückenbauwerken angewendet werden kann. Da die Bewertung des mechanischen Bauwerkszustandes im Allgemeinen mithilfe numerischer Bauwerksmodelle, wie etwa finite Elemente (FE) Modelle, erfolgt, ist unter anderem eine gute Approximation der Bauteilgeometrie essentiell für realitätsnahe Berechnungsergebnisse. Im Rahmen dieses Artikels wird daher ein Verfahren aufgezeigt, das die aus der rekonstruierten Punktwolke gewonnenen geometrischen Informationen zur Aktualisierung eines bestehenden FE-Modells verwendet. So können die tatsächlich vorhandene Achsposition und Querschnittgeometrie, welche z. B. durch Toleranzen in der Bauausführung oder bleibende Verformungen von der Plangeometrie abweichen können, berücksichtigt werden. Durch einen Abgleich der Position und Lage der 3D-Punktwolke mit den planmäßigen Bauteilgeometrien können die Ergebnisse der photogrammetrischen Rekonstruktion und Bildanalyse zusätzlich Eingang in ein digitales Bauwerksmodell finden. Ein Anwendungsbeispiel gibt BRAUN et al. (2015) mit der punktwolkenbasierten Baufortschrittskontrolle über einen Soll-Ist-Abgleich. Bestandteil der vorgestellten Methode ist die Verortung von Bilddaten aus UAS-Befliegungen auf der Geometrie eines existierenden FE-Modells. Dadurch können Bildinformationen, wie beispielsweise detektierte Anomalien, Elementen des FE-Modells zugewiesen und folglich entsprechende Anpassungen der mechanischen Eigenschaften getroffen werden. Zur Validierung der entwickelten Methode, werden alle Schritte von der Bildaufnahme bis zur Aktualisierung des FE-Modells am Beispiel der Inspektion eines Brückenpfeilers erläutert.

2 Bildbasierte Datenaufnahme und -modellierung

2.1 Visuelle Bauwerksinspektion mit UAS

Die durch UAS unterstützte visuelle Bauwerksinspektion wurde in den letzten Jahren stark weiterentwickelt, sodass professionelle Flugsysteme die Aufnahme qualitativ hochwertiger Bilder zulassen. Gerade Bauwerke großer Dimension, wie die in Abbildung 1 gezeigte Brücke, können mit solchen Befliegungen effektiv aufgenommen werden. Die erzeugte Menge an Bilddaten ist die Grundlage für weiterführende Auswertungsverfahren der visuellen Inspektion. Bei ausreichender Auflösung der Bilder können Methoden zur automatischen Erkennung optischer Anomalien, wie Risse, Abplatzungen oder Verfärbungen, angewendet werden. Dadurch ergibt sich die Verknüpfung von Bildern und enthaltenen Anomalien, welche durch ihre geometrischen Eigenschaften beschrieben werden. Eine Logik zur mechanischen Interpretation relevanter Schädigungen ermöglicht die Ermittlung daraus resultierender Änderungen lokaler mechanischer Eigenschaften im FE-Modell.



Abb. 1: Im Fallbeispiel untersuchte Scherkondetalbrücke (links) und Durchführung der Bildaufnahme mittels UAS (rechts)

Die photogrammetrische Rekonstruktion von 3D-Punktwolken erfolgt durch das Structure-from-Motion (SfM) Verfahren. Dabei werden korrespondierende Punkte in sich überlappenden Bildpaaren eines Datensatzes gesucht und somit die 3D-Geometrie des aufgenommenen Objektes rekonstruiert. Ebenso werden die entsprechenden Kamerapositionen und Blickrichtungen errechnet. Außerdem erfordert die Anwendung des Verfahrens die lückenlose Abdeckung des zu untersuchenden Bauwerks durch sich überschneidende Bilder, was bereits bei der Befliegung beachtet werden muss. Die aus dem SfM-Verfahren resultierende Punktwolke und Kamerapositionen werden über Passpunkte am Bauwerk, welche in den Bildern wiederzufinden sind, georeferenziert und sind somit mit anderen georeferenzierten Modellen abgleichbar. Abbildung 2 zeigt den schematischen Ablaufplan bis zur FE-Modellaktualisierung.

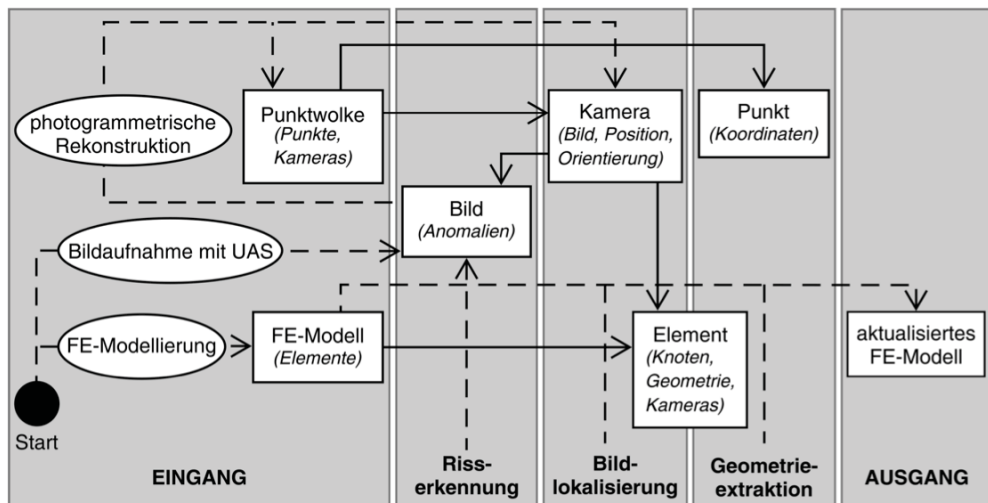


Abb. 2: Ablaufschema der FE-Modellaktualisierung durch Auswertung mittels UAS aufgenommener Bilder sowie Punktwolken und Kamerapositionen aus der photogrammetrischen Rekonstruktion (gestrichelte Linie: Prozess/Input, durchgezogene Linie: Zugehörigkeit)

2.2 Aktualisierung eines FE-Modells

Für die Zustandsbewertung eines Bestandstragwerkes und dessen Nachrechnung, ist ein numerisches Modell, welches den aktuellen Zustand möglichst genau beschreibt, unerlässlich. Abweichungen der Annahmen aus der Entwurfsphase können dabei sowohl geometrisch von der Plangeometrie z. B. durch Bautoleranzen oder bleibenden Verformungen als auch mechanisch z. B. durch die zeitliche Änderung der Materialparameter infolge von Kriechen oder durch Rissbildung verursacht werden.

Mit der Erfassung des geometrischen Ist-Zustandes können eventuelle Anfangsverformungen berücksichtigt werden, welche zu geometrisch nicht linearen Schnittgrößen führen und bei der Berechnung am nicht aktualisierten, idealen System vernachlässigt werden. Sowohl die Querschnittsgeometrie als auch die Achsposition können in einem FE-Modell anhand der extrahierten geometrischen Informationen einer rekonstruierten Punktwolke aktualisiert werden. Außerdem können Veränderungen der mechanischen Eigenschaften, welche im Allgemeinen eine Veränderung der Steifigkeit bedeuten, einbezogen werden. Die hier vorgestellte Berücksichtigung detektierter Anomalien in den aufgenommenen Bildern, kann zum Beispiel durch eine feinere Diskretisierung im Wirkungsbereich der Anomalie (Lastübertragungslänge der Verbundspannungen für Risse) und eine gleichzeitige Anpassung der Steifigkeit erfolgen.

2.3 Beispielobjekt Scherkondetalbrücke

Zur beispielhaften Anwendung der entwickelten Methode wurde ein Brückenpfeiler der Scherkondetalbrücke (Abbildung 1), als Teil der Bahnstrecke Berlin-München 2011 in Thüringen erbaut, untersucht. Die Bahnbrücke in semi-integraler Bauweise hat eine Gesamtlänge von 576,5 m, eine maximale Spannweite von 44,0 m und eine maximale Pfeilerhöhe von 32,6 m. Der Brückenüberbau ist monolithisch mit 11 der insgesamt 13 Pfeiler verbunden, welche als Stahlbetonkonstruktion mit Rechteckquerschnitt konstruiert wurden. Im April 2017 wurde eine Befliegung mit UAS an einem der mittleren Pfeiler mit einer Gesamthöhe von 32 m durchgeführt, wobei 600 RGB-Bilder mit einer Auflösung von jeweils 1,67 Pixel/mm aufgenommen wurden. Aus der photogrammetrischen Rekonstruktion im SfM-Verfahren auf Grundlage der aufgenommenen Bilder konnte der Pfeiler und Teile des anschließenden Überbaus durch ca. 600 Millionen Punkte abgebildet werden. Für die numerische Berechnung der gewählten Brücke, werden die Bauteile durch 50 cm lange Euler-Bernoulli-Balkenelemente abgebildet. Die Querschnittsgeometrie der Pfeiler wurde zunächst als Rechteck angesetzt und linear zwischen Pfeilerkopf und –fuß interpoliert.

Aus der visuellen Inspektion mit UAS resultieren hochaufgelöste Bilder, entsprechende Kamerapositionen und –orientierungen sowie georeferenzierte 3D-Punktwolken. Die aufgenommenen Inspektionsdaten werden mit dem FE-Modell verknüpft und mit den im Folgenden beschriebenen Analysemethoden ausgewertet. Abbildung 3 zeigt eine Visualisierung der rekonstruierten Kamerapositionen, Punktwolke und der Geometrie des verwendeten FE-Modells.

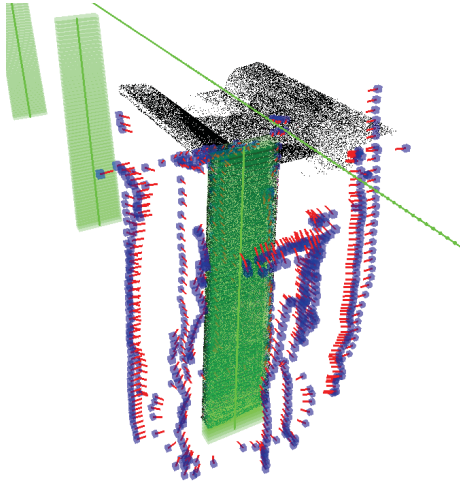


Abb. 3: Visualisierung der Knoten, Elemente und Querschnitte des FE-Modells (grün), Kamerapositionen (blau) und -orientierungen (rot) sowie der rekonstruierten Punktwolke (schwarz).

3 Modellaktualisierung mithilfe visueller Inspektionsdaten

3.1 Extraktion der Geometrieinformationen aus der Punktwolke

Bei der automatisierten Extraktion der Querschnittsgeometrie und Achsposition aus einer rekonstruierten 3D-Punktwolke werden im vorgestellten Anwendungsfall Annahmen entsprechend bauteilspezifischer Eigenschaften, wie der Eindimensionalität des Pfeilers, getroffen. Dadurch kann die Punktwolke entlang der Elementachse in Schichten unterteilt werden und die Geometrierkennung jeweils separat auf Querschnittsebene erfolgen. Die Teilung der Punktwolke in einzelne Schichten erfolgt dabei anhand der gewählten Diskretisierung des FE-Modells, sodass die Grenzen der Punktwolke jeweils durch die Mitte der Stabelemente vorgegeben sind und die Querschnittsgeometrie folglich an der Stelle des FE-Knotens ermittelt wird.

Für die Geometrierkennung in jeder Schicht wird die aus der photogrammetrischen Rekonstruktion unsortierte Punktwolke zunächst sortiert, sodass die Punktwolke in Segmente unterteilt werden kann. Entsprechend des Normalenvektors am Anfang und Ende eines Segmentes und einem vorgegebenen Winkel φ_{split} zwischen beiden Vektoren wird das Segment wiederholt geteilt bis eine ausreichende Segmenttiefe vorhanden ist. Der Prozess der Segmentierung ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. Nachdem anschließend benachbarte Segmente mit gleicher Ausrichtung zusammengefügt wurden, wird je Segment mittels einer Hauptkomponentenanalyse eine Ebene in die Punkte gelegt, welche gleichzeitig eine eventuelle Änderung der Querschnittsabmessungen entlang der Elementachse erfasst. Dabei werden Ausreißer herausgefiltert. Die Anzahl der anfänglich gewählten Segmente und der maximalen Segmentteilungen sowie der Winkel φ_{split} sind von der Querschnittsform, der Rekonstruktionsgenauigkeit und der Anzahl der rekonstruierten Punkte abhängig.

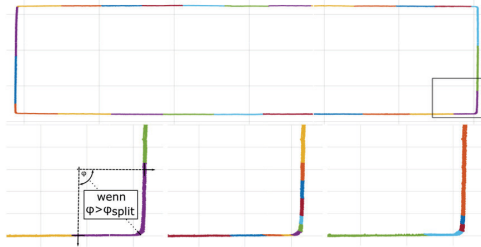


Abb. 4: Beispielhafte Segmentierung des Pfeilerquerschnitts (oben: Anfängliche Einteilung; unten: Kriterium für Teilung, Maximale Teilung der Segmente und Zusammenfügung eine Ecke)

Basierend auf den Schnittlinien der gefundenen Ebenen werden in Höhe des FE-Knotens die Punkte des Querschnittspolygonzuges ermittelt. Es kann gezeigt werden, dass mit dem vorgestellten Verfahren die Querschnittsgeometrie samt abgeschrägten Ecken sowie Abweichungen von einer perfekt geraden Bauteilkante erkannt werden können (Abbildung 5). Weiterhin wird für den ermittelten Polygonzug unter Anwendung der Gauß'schen Trapezformeln der Schwerpunkt berechnet, sodass neben der Querschnittsgeometrie auch die Lage der Stabachse, welche von einer perfekt senkrechten Lage abweicht, im FE-Modell angepasst wird.

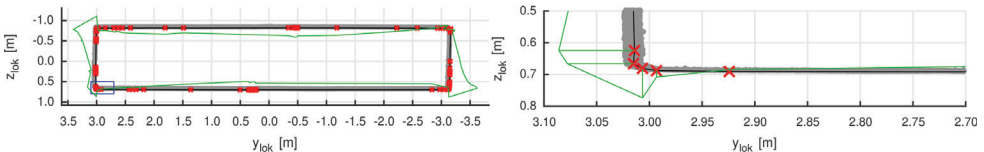


Abb. 5: Ergebnisse der Punktwolkenanalyse ($\phi_{split} = 2^\circ$) mit Differenz zur Plangeometrie (grün, überhöhte Darstellung): Polygonzug des Pfeilerquerschnitts (rechts), Detailausschnitt einer erfassten abgeschrägten Ecke (links)

3.2 Verortung detektierter Anomalien

Die Lokalisierung von Bildern und allen enthaltenen Informationen auf die Geometrie des entsprechenden Bauteils ermöglicht deren Verknüpfung untereinander und somit die Nutzung von Schädigungsinformationen zur mechanischen Interpretation. Dafür werden die Kamerapositionen genutzt, welche im SfM-Verfahren ermittelt wurden. Dabei werden jeder Kameraposition eindeutig ein Bild sowie ein Richtungsvektor auf den gedachten Bildmittelpunkt zugeordnet. Ein mögliches Format für die Beschreibung von Kameras und Punktwolken als Ergebnis einer photogrammetrischen Rekonstruktion beschreibt das Bundler-Format (SNAVELY et al. 2009).

Abbildung 6 zeigt die Verschneidung und Elementzuordnung von Bildern mittels Strahlenverfolgung (Raytracing). Durch die Position der Knoten im FE-Modell und Querschnittinformationen in den verbindenden Elementen ergibt sich eine zugehörige Volumengeometrie, welche mit dem Richtungsvektor jeder Kamera verschnitten wird. Dabei wird die Volumenoberfläche jedes Elements in Dreiecke aufgeteilt und alle möglichen Schnittpunkte ermittelt. Der Schnittpunkt mit dem geringsten Abstand zur Kameraposition wird als Teil des entsprechenden Bildes angenommen. Im Beispiel werden vereinfacht alle detektierten Anomalien auf den Bildmittelpunkt bezogen. Mithilfe der Pixelzugehörigkeit von genauen Geometrien im Bildbereich und der bekannten Brennweite der Kamera lässt sich die Methode auch auf beliebige Pixel in der Bildfläche anwenden.

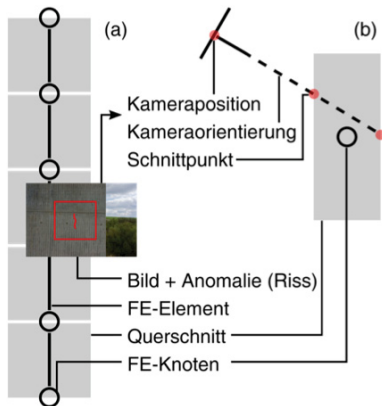


Abb. 6: (a) Schematischer Pfeilerlängsschnitt mit angedeutetem FE-Modell (Stabelemente und Knoten), Bild aus UAS-Befliegung und detektierter Anomalie (rot markierter Riss), (b) Pfeilerquerschnitt mit Kameraposition und Lokalisierung des Bildes mittels Raytracing.

Im FE-Modell des Testobjekts wurden die Verbindungen der Knoten als Stabelemente mit Anfangs- und Endquerschnitt definiert. Für jedes Stabelement des untersuchten Pfeilers ergibt sich somit eine pyramidenstumpfförmliche Geometrie, welche für das Raytracing jeweils in 8 Dreiecke (aus 4 Mantelflächen) unterteilt wird. Ergibt sich ein Schnittpunkt mit einem Element, wird diesem das entsprechende Bild zugeordnet. Dadurch ist der unsortierte Bilddatensatz bereits nach Bauteilabschnitten geordnet. Beinhaltet ein Bild zusätzliche Informationen über Anomalien in Form von relevanten Schädigungen, ist es möglich gezielt mechanische Eigenschaften des verknüpften FE-Elements zu verändern und somit den tatsächlichen aktuellen Zustand des Bauwerks genauer abzubilden.

3.3 Modellaktualisierung

Wird die in 3.1 gezeigte Querschnittsextraktion in Höhe jedes FE-Knotens durchgeführt, können Querschnittsgeometrie und Schwerpunktlage der FE-Knoten angepasst werden. Dafür werden die ermittelten geometrischen Informationen der Punktwolkenanalyse als zusätzliche Eingabeparameter bei der Erstellung des FE-Modells berücksichtigt. Durch die Berücksichtigung der realen Knotenlage werden aus dem P- Δ -Effekt stammende Schnittgrößen (hauptsächlich Momente aus Vertikallasten) bereits bei linearer Berechnung erfasst. Zusätzlich wird durch die Einbeziehung des extrahierten Querschnitts für die jeweiligen FE-Elemente ein angepasstes Trägheitsmoment berücksichtigt. Die hier vorgestellte Erfassung detektierter Anomalien in den aufgenommenen Bildern, wird über eine feinere Diskretisierung und eine gleichzeitige Anpassung der Steifigkeit in dem gestörten Bereich vorgenommen. Für den Anwendungsfall detektierter Risse wird die Breite des gestörten Bereichs quer zum Riss mit der Lastübertragungslänge der Verbundspannungen angesetzt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die visuelle Inspektion von Infrastrukturbauwerken, wie Brücken, kann effektiv durch mit Fotokameras ausgerüstete unbemannte Fluggeräte unterstützt werden. Der aktuelle Stand der Technik macht die Aufnahme von hochauflösenden Bildern des Bauwerks möglich, welche beispielsweise zur automatischen Risserkennung verwendet werden können. Ebenso ist die Anwendung von Verfahren zur photogrammetrischen Rekonstruktion der Bilder zu

3D-Punktwolken möglich. In den beispielhaft an einem Brückenpfeiler vorgestellten Methoden werden Inspektionsdaten zur Aktualisierung eines FE-Modells des Bauwerks genutzt. Dabei werden genaue Querschnittsgeometrien und Knotenpositionen aus der rekonstruierten Punktwolke extrahiert und im FE-Modell angeordnet sowie die aufgenommenen Bilder über die korrespondierende Kameraposition und –orientierung grob den Elementen des FE-Modells zugeordnet. Sind Informationen über Anomalien in den Bildern enthalten, können diese interpretiert und in die Berechnung eingebracht werden. Dadurch fließen Aufnahmen aus visuellen Inspektionen mithilfe von UAS direkt in die Ermittlung des mechanischen Bauwerkszustands ein. Geringe Abweichungen entstehen bei der Extraktion der Bauteilgeometrie aus Punktwolken, wobei gekrümmte Querschnittsgeometrien durch Polygonzüge approximiert werden. Der Einfluss Rekonstruktionsungenauigkeiten und der Anzahl der Punkte auf die extrahierten geometrischen Informationen müssen in weiterführenden Arbeiten untersucht werden. Wesentlich gröbere Annahmen werden bei der Bildverortung getroffen. Hier wird der gesamte Bereich im Bildmittelpunkt zusammengefasst, was fehlerhafte Zuordnungen von Informationen aus den Randbereichen des Bildes verursachen kann. Diese können jedoch durch eine genaue Positionierung detektierter Anomalien im Bildbereich und Anwendung des entsprechenden Winkels vermindert werden.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen der Forschergruppe „Digital Engineering für Planungs- und Revitalisierungsprozesse von Stadtquartieren“, welche vom Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds (ESF) gefördert wird.

Literatur

- BRAUN, A., TUTTAS, S., BORRMANN, A. & STILLA, U. (2015), A concept for automated construction progress monitoring using BIM-based geometric constraints and photogrammetric point clouds, In: *Journal of Information Technology in Construction*, 20, 68-79.
- DIMITROV, A., GU, R. & GOLPARVAR-FARD, M. (2016) Non-Uniform B-Spline Surface Fitting from Unordered 3D Point Clouds for As-Built Modeling, In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31, 483-498.
- MORGENTHAU, G. & HALLERMANN, N. (2016), Quality assessment of unmanned aerial vehicle (uav) based visual inspection of structures. In: *Advances in Structural Engineering*, 17(3), 289-302.
- SCHÖNBERGER, J.L. & FRAHM, J.-M. (2016), Structure-from-motion revisited, In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 4104-4113.
- SIRONI, A., TÜRETEN, E., LEPETIT, V. & FUA, P. (2016), Multiscale centerline detection. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38(7), 1327-1341.
- WALSH, S. B., BORELLO, D. J., GULDUR, B. & HAJJAR, J. F. (2013), Data processing of point clouds for object detection for structural engineering applications, In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(7), 495–508.
- SNAVELY, N., SEITZ, S. & SZELISKI, R. (2009) *Bundler User's Manual*, <http://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/bundler-v0.3-manual.html> 14.06.2018.

Automatisiertes und regelbasiertes Element-Splitting in digitalen Bauwerksmodellen

Paul Häringer und Georgios Pavlidis

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation · Technische Universität München ·
Arcisstr.21· 80333 München ·
paul.haeringer@tum.de · pavlidisgeorgios.cv@gmail.com ·

Die Modellierung und Aufbereitung eines digitalen Bauwerksmodells erfolgt größtenteils immer noch manuell. Insbesondere die Aufbereitung eines vorhandenen Modells für die Bauausführung ist noch sehr zeitintensiv und bedarf oft mehreren Iterationsschritten. Ziel ist es daher, einen Algorithmus zu entwickeln, welcher Bauteile in einzelne kleine Segmente aufteilt, die dann entsprechend auch auf der Baustelle hergestellt werden können. In diesem Beitrag wird ein Algorithmus vorgestellt, der vorhandene Wände regelbasiert und automatisiert in mehrere Wandsegmente aufteilt. Der Ansatz für diesen Algorithmus basiert auf der Datenstruktur eines Binärbaumes (binary tree data structure). Ausgehend von einem vorhandenen Objekt, dem Wurzelobjekt, werden zwei neue Objekte erzeugt. Dies erfolgt solange automatisiert, bis eine regelbasierte Abbruchbedingung eintritt.

Keywords: Building Information Modeling, Location Breakdown Structure, Revit.

1 Ausgangslage und Motivation

Mit der Methode des Building Information Modeling (BIM) erfolgt die Planung und Ausführung von Bauwerken mit Hilfe von digitalen Bauwerksmodellen. Aufgrund der Komplexität dieser Modelle existiert u.a. eine Einteilung in Fachmodelle und Fertigstellungsgrade. Hierzu existieren verschiedene Richtlinien wie die Singapore BIM Guide (BCA SINGAPORE 2013) oder die Britische Publicly Available Specification (PAS 1192) (BRITISH STANDARDS INSTITUTION 2014). Der LOG beschreibt den Detaillierungsgrad und der LOI das Maß der Informationsfülle von Objekten. Für ein Bauwerksmodell im Hochbau ist in der Entwurfsplanung mindestens ein LOD 200 vorgesehen. Im LOD 200 wird das Modell grafisch als ein allgemeines System, Objekt oder Baugruppe mit ungefähren Mengen, Größe, Lage und Orientierung dargestellt (EGGER, HAUSKNECHT, LIEBICH, PRZYBYLO 2013).

Da ein Architekt während der Entwurfsphase das gesamte Gebäude und nicht den Herstellungsprozess betrachtet, entsprechen die Dimensionen der Objekte üblicherweise nicht der ausführbaren Größe auf der Baustelle. Auch im Konzept des LOD fehlt es noch an einer ausführungsmodellierten Sichtweise zur Beschreibung des Bauprozesses.

In Abbildung 1 ist ersichtlich, dass die Wandobjekte über die gesamte lineare Strecke zwischen einem Start- und Endpunkt modelliert sind. Für die Erstellung eines Fachmodells der Architektur ist dies eine effektive Methode, da weniger Objekte modelliert und somit auch weniger Fehler entstehen. Die Herstellung solcher Objekte kann aufgrund von technologischen- und oder bauverfahrensspezifischen Gründen häufig nicht vollständig in einem Stück, d.h. in einem Herstellungsprozess realisiert werden. Solche Objekte sind für die Bauablaufplanung aufzutrennen, sodass kleinere Segmente und ausführbare Herstellabschnitte entstehen.

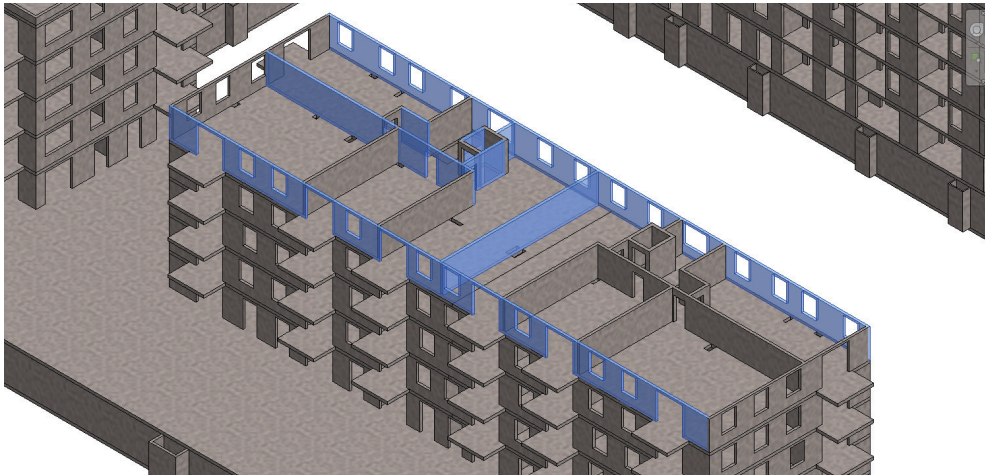


Abb. 1: Visualisierung der Modellierung von Wänden am Beispiel eines digitalen Gebäudemodells; Fachmodell Architektur LOD 200

Ein Bauwerksmodell für die Abbildung der Bauablaufplanung wird in mehrere Bestandteile und Bauphasen gegliedert. Eine erste Gliederung für Hochbauprojekte erfolgt üblicherweise in die Bauphasen Rohbau, Fassade und Ausbau (HOFSTADLER 2007). Der Rohbau stellt das Grundgerüst mit den maßgeblichen tragenden Strukturen eines Gebäudes dar.

Bei dem betrachteten Wohngebäude aus Abbildung 1 besteht der Rohbau aus Stahlbetonwänden und -decken. Eine erste grobe Abschätzung bezüglich möglicher Herstellungsabschnitte kann bereits auf Basis des Fachmodells Architektur LOD 200 erfolgen. Liegen im LOI Informationen z.B. zum Material oder ggf. zur Tragfähigkeit vor, entsteht durch Filterung dieser Informationen auf Bauteilebene das Fachmodell Rohbau LOD 200. Unter Berücksichtigung des Bauwerktyps, der Bauwerksgeometrie sowie der Festlegung der Bauweise, kann eine Auswahl des Bauverfahrens zur Herstellung dieser Objekte erfolgen.

Falls jedoch noch kein Fachmodell LOD 300 oder LOD 400 vorliegt, sind die Objekte nur mit ungefähren und noch nicht mit Ihren spezifischen Mengen dargestellt. Gegenüber eines LOD 400 Fachmodells fehlen Informationen über den detaillierteren Aufbau eines Objektes wie z.B. die genaue Angabe der Bewehrungsmenge in Stahlbetonbauteilen. Unabhängig von der Stufe des Fertigstellungsgrades, dem LOD, ist im Rahmen der Bauablaufplanung jedes Modell in Herstellungsabschnitte zu unterteilen.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Anwendungsfälle für das Element-Splitting

Im Ortbetonbau sind die kleinsten Herstellabschnitte in der Regel die Betonierabschnitte, die im Rahmen der Bauablauf- und Schalungsplanung definiert werden. Die Angabe von Betonierabschnitten ist auch im digitalen Bauwerksmodell zu hinterlegen (GSV 2017). Eine Untersuchung mit Experten aus der Praxis zeigt, dass eine Einteilung in Betonierabschnitte

nicht immer gleich ist und für ein und denselben Bauabschnitt unterschiedlich sein kann (HÄRINGER AND BORRMANN 2018). Ein Ausschnitt aus dieser Untersuchung zeigt Abbildung 2.

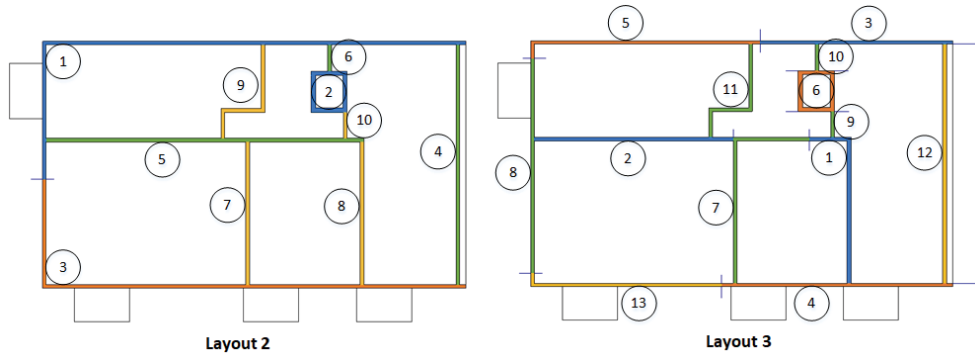


Abb. 2: Visualisierung zweier unterschiedlicher Layouts für die Taktplanung für den Bauabschnitte (halbes Geschoss) des abgebildeten Wohngebäudes aus Abbildung 1

Die einzelnen Betonierabschnitte in den Layouts sind durch Ihre Nummerierung und der farblichen Abtrennung zu den benachbarten Betonierabschnitten festgelegt. Betonierabschnitte, welche eine identische Farbe aufweisen, werden gleichzeitig innerhalb einer bestimmten Zeitperiode (Takt) hergestellt. Das Layout 2 besteht aus 10 und das Layout 3 aus 13 Betonierabschnitten. Die beiden Lösungen zeigen, dass unterschiedliche Varianten hinsichtlich der Größe und Anordnung von Betonierabschnitten möglich ist.

Die Vision ist, solche Layouts möglichst automatisiert herzustellen. Hierzu ist eine Auftrennung von existierenden Wandobjekten in kleinere Segmente erforderlich. Dieser Beitrag beschreibt eine Methode zur regelbasierten- und automatisierten Auftrennung (Element-Splitting) von solchen Wandobjekten in kleinere Segmente. Die Methode dient der Aufbereitung eines Modells, sodass durch die Aggregation kleinerer Segmente eine Menge von möglichen optimalen Betonierabschnitten und Takte erzeugt werden können. Dies mithilfe von Simulation und Optimierungsmethoden möglich sein.

Regeln sind die Limitierung der Segmentlänge, wenige und insbesondere keine Fugen in bzw. durch Öffnungen sowie eine Anpassung auf ähnlich große Taktabschnitte zur Ressourcenoptimierung. Eine Optimierung der Ressourcen bedeutet insbesondere eine Anpassung der Arbeitsgeschwindigkeit zwischen unterschiedlichen Gewerken, sodass weniger Störungen im Bauablauf auftreten (GREGORY A. HOWELL 1999) als auch die Menge an Schalungsmaterial zu reduzieren. Hierzu sollen beim Transfer zum nächsten Takt möglichst viele Schalungselemente wiederverwendet werden (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE 347 2014).

2.2 Vorhandene Methoden zur Element-Splitting

Die Software Revit von Autodesk bietet selbst zwei Methoden für das Splitting von Elementen bzw. Objekten an (AUTODESK REVIT). Die erste Methode trennt ein Objekt an ei-

nem ausgewählten Punkt in zwei separate Teile auf oder entfernt ein Segment zwischen zwei Punkten. Die zweite Methode trennt ein Objekt mit einer zuvor definierten Verbindungslücke auf. Beides sind manuelle Methoden zum Auftrennen von Objekten.

Die Firma AGA CAD bietet in Form eines Revit Add-on eine kommerzielle Lösung mit Methoden zur Splitting von Elementen an (AGA CAD). Neben manuellen existieren auch automatisierte Methoden wie z.B. das automatisierte Setzen von Trennfugen mittig zwischen Öffnungen von Wänden. Die Lösung wirkt jedoch wie eine Ansammlung von Methoden zum Element-Splitting, welche keinen oder kaum einen Bezug zu realen Anwendungsfällen wie z.B. eine Einteilung von Wänden in Betonierabschnitte.

Die Firma Trimble verfolgt eine etwas andere Strategie und bietet für Ihre Software Tekla ein eigenes Tool für das „pour planning“ an (TRIMBLE TEKLA). Das „pour planning“ ist die Planung von Betonierabschnitten. Trimble fokussiert sich auf den Vorgang des Betonierens und trennt Objekte nach deren Volumina auf. Die Auftrennung erfolgt dabei größtenteils manuell. Jedoch wird der Nutzer beim Ausführen des Element-Splittings über die Änderung des Volumens informiert. Dies unterstützt die Einteilung von Objekten in ungefähr gleich große bzw. volumenidentische Betonierabschnitte. Bei dieser Lösung liegt ein konkreter Anwendungsfall vor, allerdings erfolgt die Element-Splitting noch zum größten Teil manuell.

Standardlösungen und Anwendungsfallbezogene Lösungen zur Element-Splitting sind bisher noch größtenteils manuell. Wenn eine Automatisierung erfolgt, kann diese eher als eine Liste von nützlichen Methoden zum Element-Splitting angesehen werden. Eine automatisierte und regelbasiertes Element-Splitting für spezifische Anwendungsfälle ist nicht ersichtlich.

3 Der Element-Splitting Algorithmus

3.1 Das Funktionsprinzip des Algorithmus

Der Element-Splitting Algorithmus kann ein bestehendes Objekt in mehrere Objekte auftrennen. Die Funktionsweise basiert auf dem Prinzip der Datenstruktur eines Binärbaumes und ist in Abbildung 3 dargestellt.

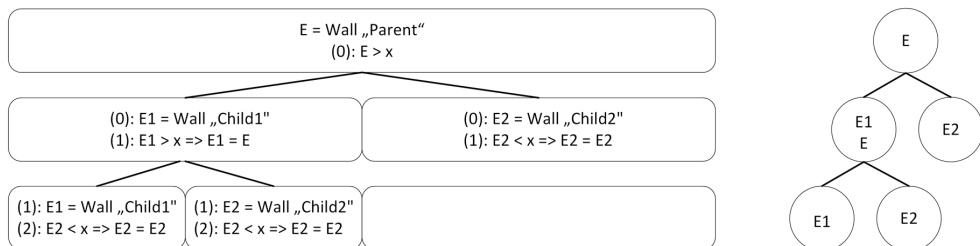


Abb. 3: Element-Splitting Algorithmus auf Basis der Binärbaum - Datenstruktur

Ein Objekt in einem Modell ist eindeutig definiert, sodass bei einer Auftrennung zumindest zwei neue Objekte generiert werden. Das Objekt Wall „Parent“ (E) repräsentiert das Wurzel-

zelobjekt und die beiden neuen generierten Objekte sind die Kinderobjekte (E1 und E2). Die Variable x definiert z.B. den Wert der maximalen Länge eines Objektes aus der Nutzereingabe. In der ersten Runde (0) prüft der Algorithmus ob das Wurzelobjekt E länger als x ist. Wenn E länger als x ist, dann wird E durch $E1$ und $E2$ ersetzt. Die zweite Runde (1) wiederholt diesen Schritt mit $E1$ und $E2$. $E1$ ist länger als x und wird zu einem Wurzelobjekt (E). $E2$ ist kürzer als x und bleibt $E2$. Dieser Schritt wiederholt sich so lange bis alle Objekte kleiner als x sind.

Zur Bestimmung der Position eines Objektes wurde die Boundary Representation verwendet. Abbildung 4 zeigt, dass mithilfe des minPoint und maxPoint sowohl die Position von rechteckigen Objekten im Raum als auch dessen Dimensionierung bestimmt werden kann.

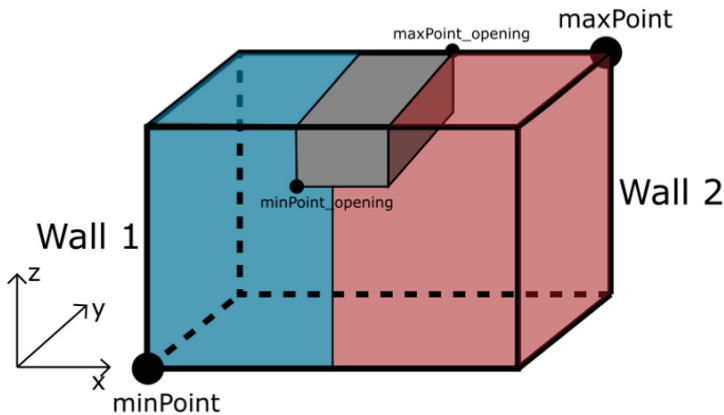


Abb. 4: Verwendung der Boundary Representation zur Bestimmung der Position von Objekten

Als Beispiel dient eine Wand, die in zwei Wände (Wall 1 und Wall 2) aufgetrennt werden soll. Das Element-Splitting erfolgt mittig, sodass das Wall 1 und Wall 2 die gleiche Länge in x -Richtung haben. Hierzu wird der Abstand zwischen maxPoint und minPoint mit 0,5 multipliziert. Ein „opening“ ist ein eigenständiges Objekt innerhalb der Wand und wird daher nicht aufgetrennt. Eine mittige Trennung ist geeignet um möglichst identische Längen einzelner Objekte zu erhalten, sodass z.B. die Wahrscheinlichkeit einer Wiederverwendbarkeit von Schalungselementen erzielt werden kann.

3.2 Verifizierung des Element-Splitting Algorithmus

Zur Verifizierung des Element-Splitting Algorithmus wurde ein Revit-Plugin entwickelt. Abbildung 5 zeigt einen Überblick über unsere implementierten Methoden zur Element-Splitting innerhalb der Modellierungssoftware Revit.

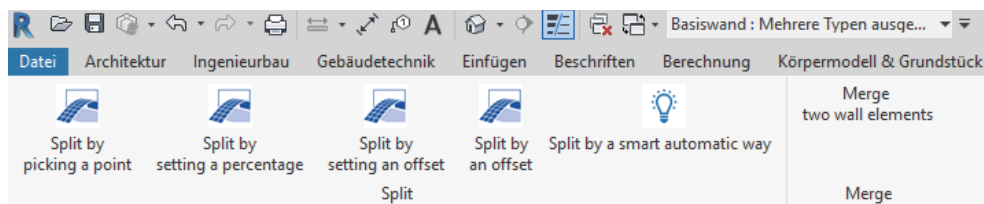


Abb. 5: Überblick der implementierten Methoden zur Element-Splitting

Gestartet wurde mit der Nachbildung vorhandener manueller Splitting-Methoden, die bereits in Revit implementiert sind. Analog zu den vorhandenen Methoden entstand die Methode „Split by picking a point“. Um das Auftrennen von Objekten durch bzw. in Bereichen von Öffnungen zu verhindern, wurden weitere Methoden entwickelt. Es wurde insbesondere mit Abstandsregelungen wie z.B. durch Eingabe eines definierten Mindestabstands (offset) zu einem Punkt oder Objekt gearbeitet. Hieraus entstanden die Methoden „Split by setting an offset“ und Split by an offset“. Im Anschluss daran entstand ein Algorithmus, der ein Objekt regelbasiert und automatisiert in mehrere möglichst gleich große Objekte aufteilt „Split by a smart automatic way“. Die Umsetzung dieses Algorithmus ist in Abbildung 6 dargestellt.

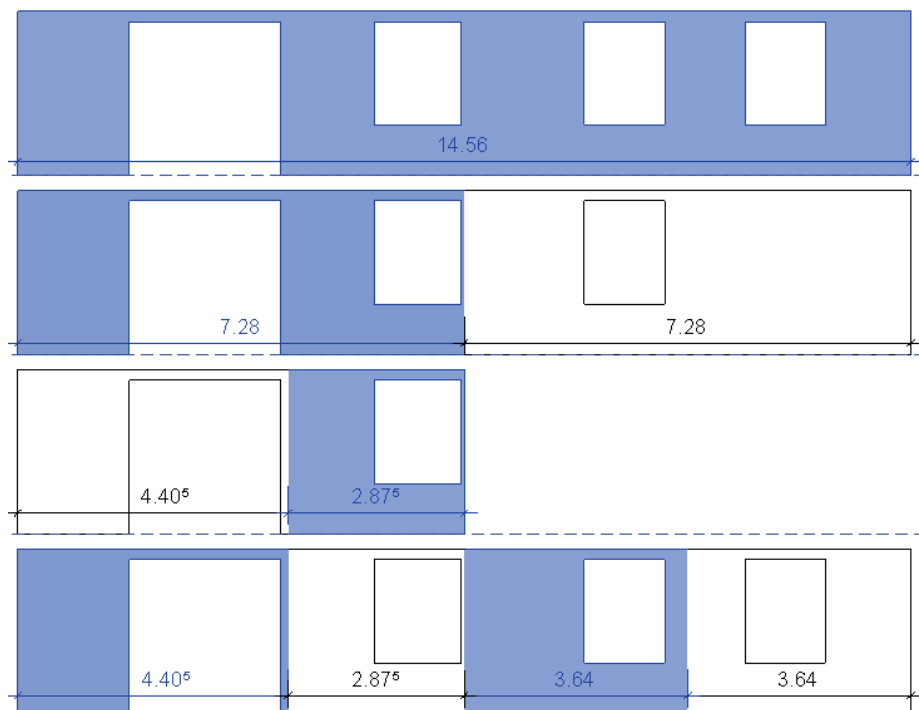


Abb. 6: Anwendungsbeispiel zur Verifizierung des Algorithmus zur automatisierten und regelbasierten Element-Splitting

Eine Wand mit einer Länge von 14.56 m soll in mehrere Segmente aufgetrennt werden. Z.B. soll die maximale Länge eines Elementes nicht größer als 5 m sein. Der Algorithmus startet und erkennt, dass die Wand länger als 5 m ist. Da in der Mitte der Wand keine Öffnung vorhanden ist, kann diese exakt in der Mitte nach 7,28 m aufgetrennt werden. Der Algorithmus löscht alle Elemente und ersetzt die alte Wand durch zwei identisch lange neue Objekte. Die Schleife beginnt erneut und es wird geprüft, ob die neuen Objekte länger als 5 m sind. Die Objekte sind mit 7,28 m wieder länger als 5 m und der Algorithmus generiert aufgrund der Öffnung im ersten Objekt zwei Objekte mit ungleicher Länge. Damit keine Trennung am Rand einer Öffnung entsteht, wurde ein Mindestabstand (offset) implementiert. Dieser greift jedoch nur, wenn die Position des Splittingpunktes sich innerhalb einer Öffnung befindet. Dieser Mindestabstand ist derzeit ein fixer Wert (12 cm). Deshalb entsteht hier ein 4.405 m und ein 2.875 m langes Objekt. Befindet sich die Position des Splittingpunktes außerhalb einer Öffnung können noch zu geringe Mindestabstände zwischen Öffnungen und Splittingpunkten entstehen. Dies ist bei dem ersten Splitting nach 7,28 m in Abbildung 6 erkennbar, wo der Mindestabstand zur Öffnung zu gering ausfällt. Das zweite Objekt kann dagegen mittig aufgetrennt werden, sodass zwei Objekte mit identischer Länge (3.64 m) entstehen.

4 Zusammenfassung

Der Algorithmus trennt Objekte (Wandelemente) auf und erzeugt mehrere neue Objekte (Wandsegmente) bis die Abbruchbedingung der maximalen Länge erfüllt ist. Aufgrund der Auftrennung an der vertikalen Mittelachse werden Objekte mit identischer Länge generiert. Die Regel, dass keine Trennungen durch bzw. in Bereichen von Öffnungen erlaubt sind, ist als harte Randbedingung implementiert. Deshalb können auch Objekte unterschiedlicher Länge entstehen. Befindet sich der Splittingpunkt nicht innerhalb einer Öffnung erfolgt derzeit keine Überprüfung eines Mindestabstandes zwischen Öffnungen und Splittingpunkten. Wände können daher noch zu nah an Öffnungen aufgetrennt werden. Dies könnte z.B. durch die Definition von sogenannten „non cutting areas“ verhindert werden, sodass geschützte Bereiche entstehen, in denen keine Auftrennung erfolgen darf.

Literatur

- AGA CAD. "Toolbox for Wall and Join Management." <<http://www.agacad.com/products/tools4revit/smart-walls>> (Jun. 24, 2018).
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE 347 (2014). Guide to formwork for concrete: An ACI standard, 347-14, ACI, American Concrete Institute, [Detroit, Michigan].
- AUTODESK REVIT. "Split Elements." <<https://knowledge.autodesk.com/support/revit-learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/RevitLT-Model/files/GUID-40DAA2D0-9797-4937-AE6B-51EC92D599BC-htm.html>> (Jun. 24, 2018).
- BCA SINGAPORE (2013). Singapore BIM Guide, 2nd ed <https://www.corenet.gov.sg/media/586132/Singapore-BIM-Guide_V2.pdf (accessed 4 October 2016)>.

- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (2014). PAS 1192-2:2014: Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling.
- EGGER, HAUSKNECHT, LIEBICH, PRZYBYLO (2013). BIM-Leitfaden für Deutschland.
- GREGORY A. HOWELL (1999). WHAT IS LEAN CONSTRUCTION-1999, In Proceedings IGLC. Vol. 7.
- GSV (2017). BIM-Fachmodell Schalungstechnik (Ortbetonbauweise) Datenaustauschmodell zum Einsatz von BIM-Methoden in der Schalungsplanung Information Delivery Manual IDM
<[https://www.gsvbetonschalungengen.de/media/files/deutsch/download_merkblaetter_richtlinien/2017_07_06_GSV-Richtlinie-BIM-Fachmodell-Schalungstechnik-\(Ortbetonbauweise\).pdf](https://www.gsvbetonschalungengen.de/media/files/deutsch/download_merkblaetter_richtlinien/2017_07_06_GSV-Richtlinie-BIM-Fachmodell-Schalungstechnik-(Ortbetonbauweise).pdf)>.
- HÄRINGER, P., AND BORRMANN, A. (2018). "Evaluation of a Case Study to Design a BIM-Based Cycle Planning Concept." 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 10.24928/2018/0224.
- HOFSTADLER, C. (2007). Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- TRIMBLE TEKLA. "Successful Pours 2.0: Concrete tools for transforming pour planning and information management."
<<https://www.tekla.com/sg/about/webinars/video/successful-pours-20-%E2%80%93-concrete-tools-transforming-pour-planning-and-information>> (Jun. 24, 2018).

An Algorithm to Generate and Process the Variation Model for Mass Simulation

Fangzheng Lin¹ and Ngoc Trung Luu²

Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Str.31a · 01062 Dresden ·

¹E-Mail: fangzheng.lin@tu-dresden.de · ²E-Mail: ngoc_trung.luu@tu-dresden.de

Nowadays, Building Information Modeling (BIM) brings digitalization into the Architecture Engineering Construction (AEC) industry. It enables informatics to optimize the traditional technologies of mass simulation. A pain point of involving BIM into mass simulation would be the large amount of data for various models. It could lead to data exchange with a poor efficiency. This paper presents an algorithm to implement the Variation Model (VM) to prevent mass simulation from massive data exchange. With a VM, the data for exchange consists of original models and their corresponding parameter variants instead of a set of model variants with huge data volume. This algorithm is not only capable to build but also process VMs. In processing, parameter variants from a VM are inserted into a local SQLite database, where Structured Query Language (SQL) JOIN operators are executed to manage them. After that, a series of model variants can be generated locally for following application as well. The algorithm of this work focuses on IFC models. Extending and deepening the functionality of this algorithm to other types of data files will be the further improvement.

Keywords: data exchange, variation model (VM), model variant, mass simulation

1 Background

1.1 Mass Simulation and BIM

Massive simulation or mass simulation means a simulation running with massive data. In a structure project, civil engineers use mass simulation in phases of design, operation and maintenance. E.g., estimating the health state of an aged bridge (SIRINGORINGO & FUJINO, 2008 and CHAUDHARY, ABE, FUJINO, & YOSHIDA, 2000), in which a simulation with numerous model variants are executed; predicting the crowd's behavior in a building at the time of fire or terror attacks, where various evacuation cases could be simulated (WAGNER & AGRAWAL, 2014).

Along with the tendency of informationizing the industry, the development of Building Information Modelling (BIM) speeds in each aspects of the whole life cycle of a building project from parametric design (HUBERS, 2010), via model convention for structural analysis (BANFI, FAI & BRUMANA, 2017), to monitoring and renovation (PARK, KIM & CHO, 2017). Therefore, it is expected to combine the informatics technologies and the mass simulation method together as a further step of the implementation of BIM. In that case, data exchange becomes a major concern. It may cause an insufficient data transmission and data processing that a large amount of various model variants is directly sent to/from other sections of the building project without any assistance.

1.2 IFC File

Industry Foundation Classes (IFC) is developed and maintained by buildingSMART International as its “Data standard” (BUILDINGSMART, 2018). The IFC Standard has become one of the mainstream formats for data exchange among the different roles in the life cycle of a building project. There are two kinds of different serialization of the IFC formats: SPF and XML. These two formats own suffixes respectively, “.ifc” and “.ifcxml”. The IFC file with the suffix “.ifc”, usually called as IFC file, satisfies the demand of lightweight exchange better because of its smaller file size. There are some open source toolboxes to process or visualize an IFC file, such as *apstex IFC Framework* (APSTEX TAUSCHER UND THEILER GBR, 2018, developed by Java), *IfcOpenShell* (KRIJNEN, 2017, developed by C++), *BIMSurfer* (MIT, 2018, developed by JavaScript), etc.

2 Methods

2.1 Variation Model

Variation Model (VM) is created aiming at data exchange for mass simulation. The concept of the VM is defined as schema with XML Schema Definition (XSD) and is serialized in XML format. It is composed of following main parts: *Resource*, *Variable*, *Variation*, and *Target* (Fig. 1). The Uniform Resource Locators (URLs) like a file path, a web link to the original model, lay in *Resource*. *Variable* indicates the corresponding attributes, whose values or features change partially for creating model variants. *Variation* is the section for parameter variants, either a single list as *Parameter Variation* or a plenty of lists as *Group Variation*. Besides, an attribute *Join Operator* is attached in a VM. In *Join Operator*, three operations INNERJOIN, OUTERJOIN and CROSSJOIN are defined to handle complex parameter variants. Simulation targets are able to be defined and to change in *Target*. As an advantageous carrier for data exchange, a VM managing the data exchange of model variants in smaller quantities contains original models and the corresponding parameter variants instead of a number of complete files of model variants. Theoretically, VMs are designed for the application in every possible field of mass simulation with variant models. However, the paper focus on its functionality in dealing with IFC files.

2.2 BimFit and JSDAI

JSDAI is a toolkit/library for the development of Standard for the Exchange of Product data (STEP) according to the international standard ISO 10303 (LKSOFTWARE GMBH, 2007). It serves for manipulating STEP files. The *BIMFilterToolkit* (*BimFit*) library developed from the *JSDAI* by the Institute of Construction Informatics at TU Dresden is an IFC file oriented JAR file. *BimFit* owns Java classes and a list of methods, e.g. the method in the class *StepParser* is able to parse a STEP file into instances based on a given Express scheme; the class *StepDataModel* contains methods, through which IFC entities, their references and attributes could be filtered out, displayed, checked.

2.3 Toolkits Re-Development

Jpype is an effort to allow Python programs full access to Java class libraries (MENARD & NELL, 2018). It converts a class with its methods in a JAR file as a jpype-class. The includ-

ed methods are invoked with “*jpye-class_name.method_name (*arguments)*”. *Lxml* (BEHNEL, 2018) helps generate the content and process a VM in the XML format. *SQLite* is an in-process library that implements a self-contained, server-less, zero-configuration, transactional SQL database engine (HIPPE, 2018). Unlike most other SQL databases, *SQLite* does not have a separate server process.

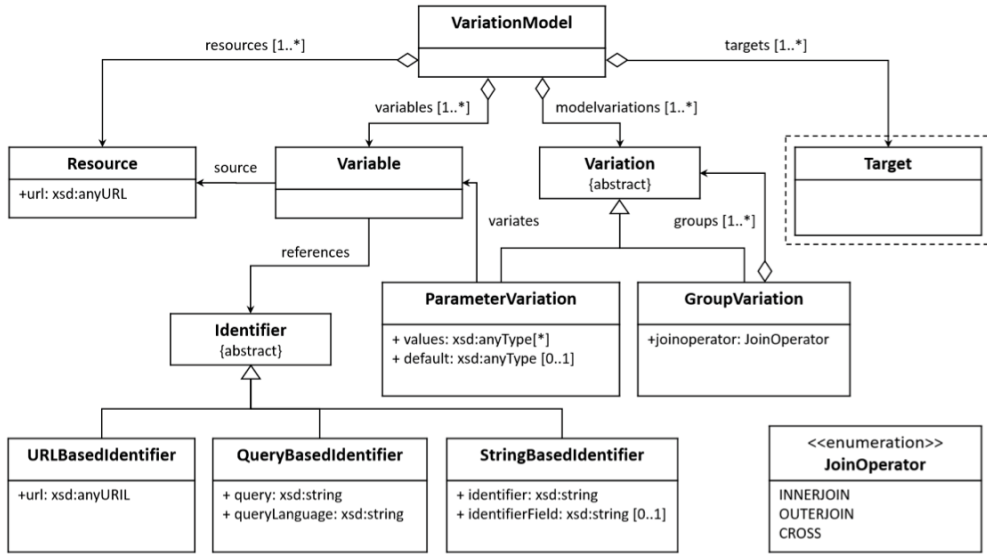


Fig. 1: UML class diagram of Variation Model (LUU, HAMDAN, POLTER & SCHERER, 2018)

The original functions of toolkits above do not cover the requirements of the work in this paper. The functions of these toolkits in Section 2 ought to be integrated together. However, the attributes of an IFC entity cannot be altered yet with the filter functions from *BimFit*. Therefore, new classes and methods are supposed to be developed due to these shortcomings. Aside from basic functions to mine useful information in an IFC file, the following main capabilities have been realized in this algorithm:

- Get the entire references of an IFC entity
By a given persistent label number of a certain IFC entity, the entire referenced entities are displayed as the output.
- Alter the attribute values of IFC entities
Through a given persistent label number and a known attribute name, the corresponding values of no matter number or string are altered in to new ones.
- Generate a series of model variants
The entities of interest in the original IFC file are replaced by the IFC entities with new attributes.
- Build and process VMs
Depending on the XSD file of the VM, a VM in XML format is produced, in which data of interest for mass simulation stands. That data can be read by the algorithm. The chosen JOIN operator in a VM is directly related to the SQL command in database.

3 Process Flow

The process flow diagram in Fig.2 demonstrates how the algorithm generates and executes VMs and an original IFC model transforms to model variants. These two functions compose the algorithm mainly.

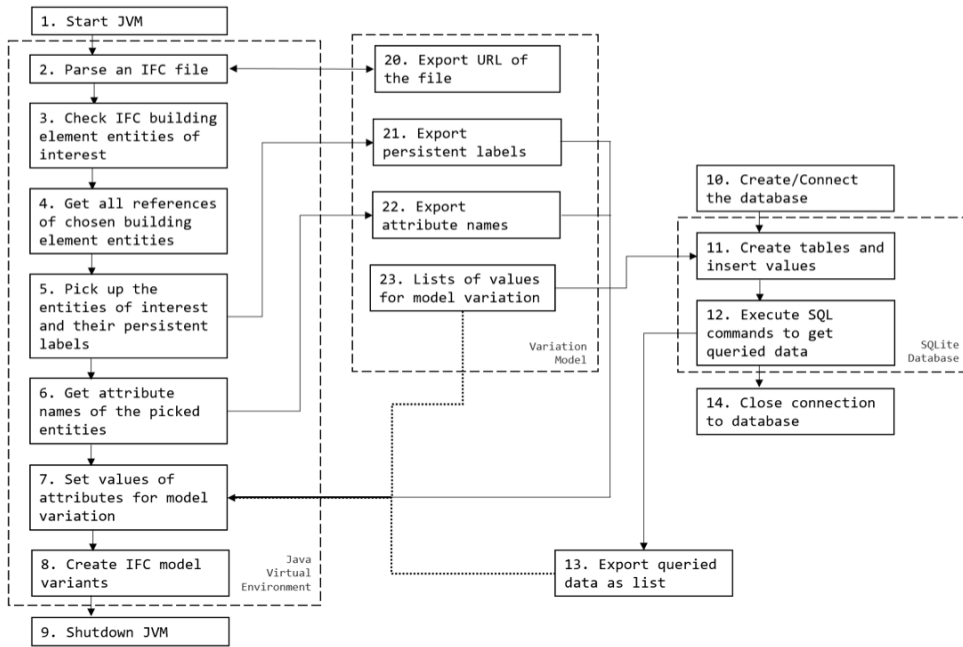


Fig. 2: Process flow diagram of the Algorithm

3.1 Parse IFC models

It is necessary to check out the entire entities after parsing an IFC file, which is the original model, in Java virtual environment (Block 1, 2, 3 in Fig. 2). Generally, an IFC model contains entities of building elements with a same name. The essential entities of building elements for variation should be chosen, all entities of chosen building elements are obtained in order to find out persistent labels of entities owing the attributes for variation (Block 4, 5, 6 in Fig. 2).

3.2 Generate and Execute a Variation Model

After steps in Section 3.1, the URL of an IFC file, the chosen persistent labels and the attribute names for variation are available. Then, IFC file URLs become the content of *Resource*, the chosen persistent labels and the attribute names for variation are located in *Variable*. The values for variation is regarded as available parameters (Block 20, 21, 22, 23 in Fig. 2). In executing a VM, the list of values will be inserted into a SQLite database,

where they are going to be re-operated by SQL commands for next operations (Block 10, 11, 12, 14 in Fig. 2).

3.3 Transform to Model Variants

The output data from Section 3.1 and Section 3.2 serves as the input here. Persistent labels and attribute names indicate the position of new values. The list of values for variation or the query results from database work as method arguments, so that the relevant attribute values are changed. Subsequently the IFC model variants are generated in the output file path (Block 7, 8, 9, 13, 21, 22, and 23 in Fig. 2).

4 Case Study

A wall model in the IFC format and the variants of geometric parameters (Table 1) are a simple example in the case study to validate this algorithm. Each geometric parameter in Table 1 has three variants. That means there are 27 different IFC model variants exported in total, regardless of the original geometric values. First off, through putting in the name “*ifcwall*”, the corresponding entities are obtained (Fig. 3). *IfcWallStandardCase* is the entity required. By giving the persistent label #173, the complete references of that entity return. The referenced entities for variation with persistent numbers #156 and #154 could be found (Fig. 4). It is known that the attributes xdim, ydim and depth in entities #154, #156 represent the length, width and height respectively.

Table 1: Geometric information of the wall example

Geometry	Original value	Parameter Variants		
Length (m)	16	5	10	15
Width (m)	0.36	0.3	0.6	0.9
Height (m)	6	1	5	20

```
|---#173=IFCWALLSTANDARDCase('2OjFk$dJr2_vX0A97rL5Q1',#41,...
|---#217=IFCWALLTYPE('3bwM3TsFfBrPuWULpeaa41',#41,'Basiswand:MW...
```

Fig. 3: Output of search “*ifcwall*”

```
|---#142=IFCLOCALPLACEMENT(#124,#141);
|---#124=IFCLOCALPLACEMENT(#32,#123);
|---#156=IFCEXTRUDEDAREASOLID(#154,#155,#19,3.0);
|---#154=IFCRECTANGLEPROFILEDEF(.AREA.,$,#153,16.0,0.36);
|---#6=IFCCARTESIANPOINT((0.0,0.0,0.0));
|---...
```

Fig. 4: Output of getting references of *IfcWallStandardCase* #173 (partially)

```
<VariationModel creator...>
  <resources>
    <resource creator="..." domain="" format="" id="VKbcNM9F" type="">
.../IfcFile/wall_case.ifc</resource>
  </resources>
  <associatedElements>
    <variable dataType="" description="" id="05ALESJC" resourceID="VKbcNM9F"
scale="" variationType="MODEL">
    <stringbasedidentifier identifier="depth" identifierField="#156"/>
  </variable>
  ...
  <modelvariations>
    <modelvariation namebase="" namepattern="" scale="">
    <groupvariation joinOperator="CROSSJOIN">
    <parametervariation defaultValue="" variableID="05ALESJC">
      <v>1</v>
      <v>5</v>
      <v>20</v>
    ...
```

Fig. 5: The XML file of Variant Model (partially)

```
['#154=IFCRECTANGLEPROFILEDEF(.AREA.,$,#153,5.0,0.3);',
'#156=IFCEXTRUDEDAREASOLID(#154,#155,#19,1.0);']

['#154=IFCRECTANGLEPROFILEDEF(.AREA.,$,#153,5.0,0.6);',
'#156=IFCEXTRUDEDAREASOLID(#154,#155,#19,1.0);']

...
```

Fig. 6: Output of entities with parameter variants (partially)

In succeeding steps, a Variant Model in XML format is generated, where the file paths/links attribute names, and parameter variants are all stored. In addition, the id-references of components are coupled (Fig. 5). This algorithm processes a VM, filters the URL out for importing the original model, fetches the values of attributes *identifier* and *identifierfiled* in *stringbasedidentifier* under *variable* to locate the entities and their attributes, and inserts parameter variants into database, where the CROSSJOIN operator is executed to create a table of the size 27×3 . Then the new entities #154 and #156 with parameter variants are created (Fig. 6). Meanwhile, a series of IFC model variants appear in the file path of output (Fig. 7).

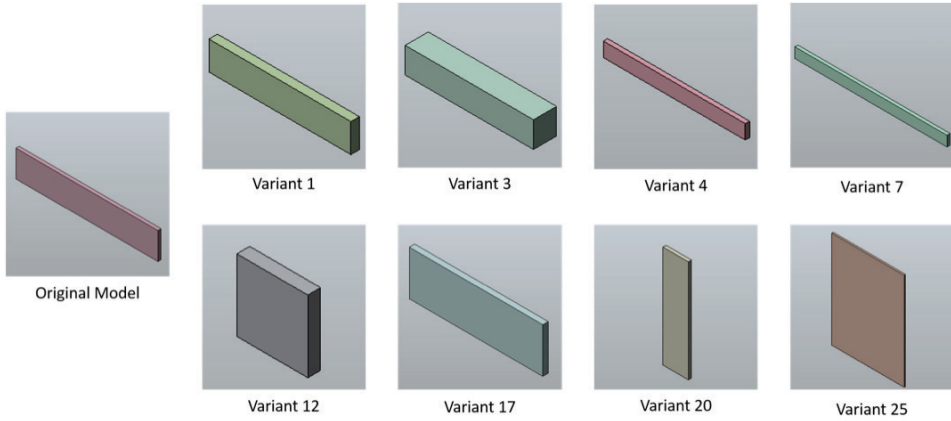


Fig. 7: The original model and its model variants (visualized by *IfcOpenShell-Python*)

5 Conclusion and Outlook

This paper indicates how to implement the Variation Model for mass-simulation-oriented data exchange, including saving data in an XML file, bridging the reference relations between elements, and processing the VM to create model variants. Through the new developed python algorithm, a VM in XML format that keeps data exchange for mass simulation a giant volume is generated. Besides, a SQLite database is established for the purpose of data management of parameter variants.

Theoretically, all the attributes of IFC entities can be modified so far. Changing the Geometry of an IFC file in the case study simply performs the functionality of this algorithm in an explicit way. As a more practical utilization, the simulation of numerous structure model variants with diverse material parameters could be executed for system identification.

This algorithm has two directions of improvement. Firstly, only IFC model variants could be generated at present. The function of processing other kinds of model files will be developed. Secondly, if one IFC model contains a few entities of building elements owning a same name, for example an entity *IfcBuilding* has several entities named *IfcWall*. It would be difficult for users to distinguish them directly at the code level. With the help of an integrated model viewer, that problem might be solved in the future.

This research work was enabled by the support of the Federal Ministry of Education and Research of Germany to the funding of the projects iSiGG (project number 01|S16009B).

Literature

- BUILDINGSMART (2018): <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-overview>
- APSTEX TAUSCHER UND THEILER GBR. (2018). Retrieved from apstex IFC Framework: <http://www.apstex.com/>
- BANFI, F., FAI, S., & BRUMANA, R. (2017). BIM Automation: Advanced Modeling Generative Process for Complex Structures. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume IV-2/W2, 2017, 9-16.
- BEAZLEY, D., & JONES, B. (2013). *Python Cookbook*. O'Reilly and Associates.
- BEHNEL, S. (2018). Von lxml - XML and HTML with Python: <http://lxml.de/> abgerufen
- CHAUDHARY, M., ABE, M., FUJINO, Y., & YOSHIDA, J. (2000). System Identification of Two Base-Isolated Bridges Using Seismic Records. *Journal of Structural Engineering*, 1187-1195.
- HIPP, R. (2018). Retrieved from SQLite: <https://www.sqlite.org/index.html>
- HUBERS, J. (2010). IFC based BIM or parametric design? *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. Nottingham: Nottingham University Press.
- KRIJNEN, T. (2017). Retrieved from IfcOpenShell: <http://ifcopenshell.org/>
- LKSOFTWARE GMBH. (2007). Von JSDAI: http://doc.jsdai.net/jsdai_doc/
- LUU, N., HAMDAN, A., POLTER, M., & SCHERER, R. (2018). A Variation Model Method for Real Time System Identification in Bridge Health Monitoring. *IABSE Conference*. Copenhagen.
- MENARD, S., & NELL, L. (2018). Retrieved from JPyte documentation: <http://jpyte.readthedocs.io/en/latest/userguide.html>
- MIT. (2018, 2). Retrieved from BiM surfer: <http://bimsurfer.org/>
- PARK, J., KIM, K., & CHO, Y. (2017). Framework of Automated Construction-Safety Monitoring Using Cloud-Enabled BIM and BLE Mobile Tracking Sensors. *Journal of Construction Engineering and Management*.
- SIRINGORINGO, D., & FUJINO, Y. (2008). System Identification of Suspension Bridge from Ambient Vibration Response. *Engineering Structures*, 462-477.
- WAGNER, N., & AGRAWAL, V. (2014). An Agent-Based Simulation System for Concert Venue Crowd Evacuation Modeling in The Presence of A Fire Disaster. *Expert Systems with Applications*, 2807-2815.

BIM für den Brückenbau: LoD-Konzept und FEA-Workflow in der Tragwerksplanung

Konstantinos Vryonis

Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen · Ruhr-Universität Bochum · Universitätsstraße 150 ·
44801 Bochum · E-Mail: konstantinos.vryonis@rub.de
HOCHTIEF Engineering GmbH, Consult Infrastructure · Alfredstraße 236 · 45133 Essen ·
E-Mail: konstantinos.vryonis@hochtief.de

Spätestens seit Bekanntgabe des Stufenplans „Digitales Planen und Bauen“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur und damit der Vorgabe eines soliden BIM-Niveaus bei neu zu planenden Projekten des Infrastrukturbaus ab dem Jahr 2020, werden dringend Standards und Richtlinien für die Umsetzung der Methodik im Brückenbau benötigt. Dabei unterscheiden sich die BIM-Anwendungsfälle in unterschiedlichen Projektphasen sowohl in ihren Anforderungen an die Modelldetaillierung (Level of Development) als auch in der Anwendung fachspezifischer, modellbasierter Analysen. Als langfristiges Ziel gilt vor allem die vollständige Integration des Anwendungsfalls Tragwerksplanung in den BIM-Prozess. Dies erfordert neben der Entwicklung konkreter Level of Development Definitionen insbesondere eine sensible Betrachtung der statischen Modellabstraktion im Zuge der Finite-Elemente-Analyse (FEA) als auch der möglichen Automatisierungsschnittstellen von Building Information Model und FE-Software.

Keywords: Building Information Modeling, Brückenbau, Tragwerksplanung

1 BIM-gestützte Tragwerksplanung im Brückenbau

1.1 Grundlagen

Building Information Modeling beschreibt den Prozess der computergestützten Erzeugung, Änderung und fortwährenden Verwaltung eines digitalen Bauwerksmodells als 3D-Abbild der Realität mit hoher, zusätzlicher Informationstiefe (BORRMANN & KÖNIG 2015). Dabei optimiert die Planung am dreidimensionalen Bauwerksmodell zum einen die Konstruktion von passgenauer Geometrie und konsistenten Plänen, zum anderen jedoch vor allem die Nutzung der hohen zusätzlichen Informationsdichte des Modells für fachspezifische Analysen. Die Daten, die im Rahmen solcher Analysen dem Modell entnommen werden, unterscheiden sich je BIM-Anwendungsfall und Detaillierung in ihrer Art, Quantität und Qualität. So werden für Mengen- und Kostenermittlungen beispielsweise verknüpfte Bauteilmassen mit Kostenstellen je Masseneinheit extrahiert und analysiert, in der Terminplanung dagegen unter Umständen Bauphasen, Einbauzeiträume oder Konstruktionsdauer in einer Bauablaufsimulation (GÜNTHER & BORRMANN 2011).

Der Tragwerksplanung kommt als statisch-konstruktive Planung der tragenden Struktur des Bauwerks vor allem im Infrastrukturbau eine hohe Bedeutung zu, da die komplexen Geometrien der Tragwerke durch aufwendig vereinfachte Finite-Elemente (FE) Modelle abstrahiert, bemessen und analysiert werden müssen (NÖLDGEN 2016). Die direkte Verknüpfung des objektorientierten Bauwerksdatenmodells und dessen Informationen zur Originalgeo-

metrie mit dem üblicherweise separat erzeugten FE-Modell entspringt dabei der konsequenten Umsetzung der BIM-Philosophie einer zentralen Erfassung und Verwaltung von Bauwerksinformationen im Building Information Model und ermöglicht den Umgang mit konsistenten Daten der Tragwerksstruktur bei gleichzeitiger Aufwandsminimierung.

Der vorliegende Beitrag liefert einen allgemeinen Lösungsansatz für die Integration der Tragwerksplanung in den BIM-Prozess, indem die Abstraktion des Tragwerks durch Grundelemente der Finite-Elemente-Analyse als fester Bestandteil des objektorientierten Bauwerksdatenmodells festgelegt wird. Dabei werden neben dem geometrischen (Level of Geometry) und alphanumerischen (Level of Information) Informationsgehalt die statische Abstraktion (Level of Abstraction) als neue Kategorie der Modelldetaillierung definiert. Es wird ein spezifischer Prozessworkflow vorgestellt, der die Möglichkeiten der Nutzung der Bauwerksdaten aus dem Building Information Model aufschlüsselt in o. g. Datenpakete Geometrie, Information und Abstraktion für die Tragwerksanalyse in FE-Programmen und der allgemeinen Tragwerksplanung zeigt.

1.2 Modelldetaillierung und Level of Development

Die Basis BIM-gestützter Arbeitsprozesse bildet das objektorientierte 3D-Bauwerksmodell, das einem digitalen Abbild des realen Bauwerks entspricht. Dabei werden der geometrischen Repräsentation zusätzliche, alphanumerische Informationen zugeordnet, die durch die jeweiligen Anforderungen des BIM-Anwendungsfalls bestimmt werden. Der „Level of Development“ (auch „Level of Detail“) bzw. LoD beschreibt dabei den Grad der Detaillierung von Geometrie („Level of Geometry“ bzw. LoG) und Informationen („Level of Information“ bzw. LoI) des Building Information Model und entspricht somit dem Fertigstellungsgrad des Modells (HAUSKNECHT & LIEBICH 2016).

$$\text{LoD} = \text{LoG} + \text{LoI} \quad (1)$$

Der Level of Development definiert in unterschiedlichen Projektstufen die Anforderungen an die zu erbringende Informationsqualität des Building Information Model zur weiteren Nutzung in fachspezifischen Analysen oder zur Planableitung in entsprechenden Detaillierungsstufen.

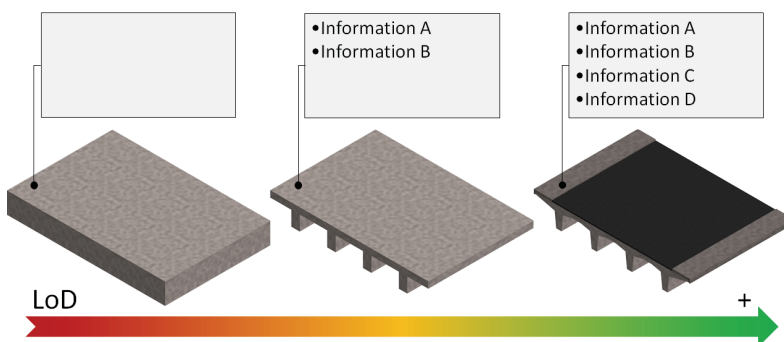


Abb. 1: Prinzip eines steigenden Level of Development

2 LoD-Konzept und FEA-Workflow in der Tragwerksplanung

2.1 Problemstellung

Die Problemstellung, die sich bei der BIM-gestützten Tragwerksplanung ergibt, wird bedingt durch den Charakter der fachspezifischen Tragwerksanalyse des Anwendungsfalls. Diese kann anders als eine Kosten- oder Terminplanung zunächst nicht automatisch anhand der im Modell gespeicherten Informationen durchgeführt werden, da sie einer separaten statischen Modellbildung durch ein FE-Modell und entsprechender Definitionen von Lagerungsbedingungen und Lastfällen bedarf. Eine Formulierung von Level of Development in der Tragwerksplanung zur Sicherstellung einer ausreichenden Informationsqualität des Modells erfordert somit neben den geometrischen und semantischen Detaillierungen ebenfalls eine statische Komponente. Dadurch ergeben sich konsequenterweise weitere Unklarheiten bezüglich der Schnittstelle von Building Information Model und FE-Software. Hier müssen konkrete Paradigmen den Datenaustausch von Modell und Analyse definieren. Neben der allgemeinen Problematik im Umgang mit den Modellinformationen fehlen im Brückenbau zudem noch hinreichende Softwarelösungen zur technischen Umsetzung. Als erster Ansatz bieten sich Adaptionen aus dem weiter fortgeschrittenen Bereich des Hochbaus an.

2.2 Level of Development in der Tragwerksplanung

Um die für die Tragwerksanalyse unzureichende Informationsdichte des einfachen Building Information Model zu erweitern, wird neben dem Level of Geometry und Level of Information eine neue Kategorie definiert, die die Abstraktion des geometrischen Tragwerks durch das statische Modell beschreibt: Der „Level of Abstraction“ bzw. LoA. Der Level of Development eines Building Information Model wird im Anwendungsfall Tragwerksplanung durch die Kombination aus geometrischer, semantischer und statischer Detaillierung des Tragwerkselements im Modell beschrieben.

$$\text{LoD} = \text{LoG} + \text{LoI} + \text{LoA} \quad (2)$$

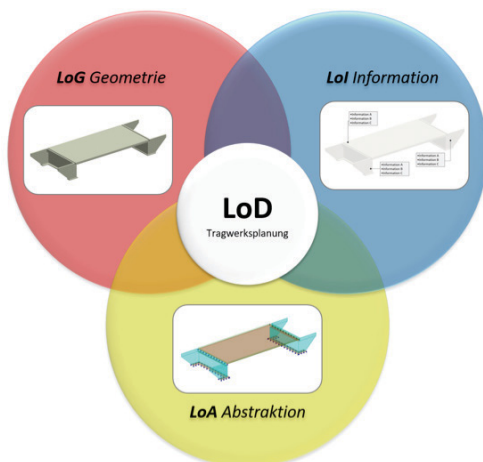


Abb. 2: Level of Development in der Tragwerksplanung

Hierbei besitzt das Tragwerkselement neben der geometrischen Repräsentation ein gekoppeltes, analytisches Modellelement, das den Grundbausteinen eines FE-Modells entspricht und sich an den Abmessungen der Originalgeometrie orientiert. Dieses integrierte analytische Modellelement, üblicherweise ein Stab- oder Flächenelement der Statik, ist demnach kein separates Objekt, sondern mit dem Modell verbunden und spricht direkt auf Veränderungen der Geometrie an. Dem Tragwerksplaner werden dabei bereits im Building Information Model Möglichkeiten eröffnet, das Modell auch statisch weiter zu detaillieren, Lagerungen und kinematische Kopplungen zu definieren, oder Lastfälle anzusetzen.

Die Einführung des Level of Abstraction ermöglicht die Definition eines festgelegten Detaillierungsstandes des Modells bezüglich der Nutzbarkeit für die Tragwerksanalyse. So kann ein geringerer Detaillierungsstand der Haupttragelemente als Anforderung einer geplanten Entwurfsstatik und ein höherer unter Umständen zur Bemessung der Detailschlüsse zwischen Tragwerkselementen definiert werden.

2.3 FEA-Workflow

Die verschiedenen Datentransfers zwischen Building Information Model und FE-Programm im Rahmen einer Tragwerksplanung werden in einem Prozessworkflow in Abb. 3 dargestellt.

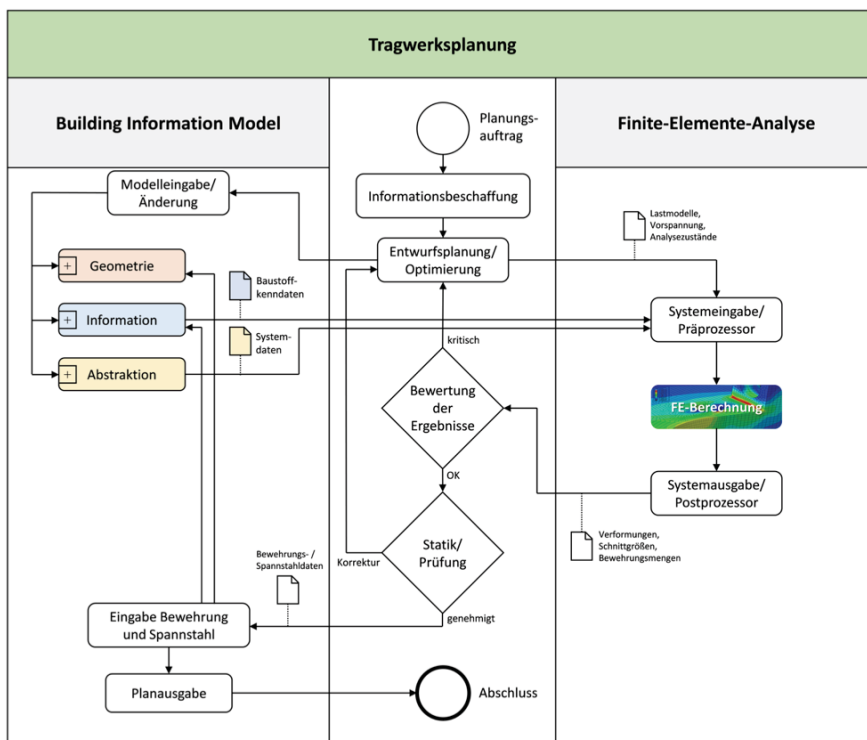


Abb. 3: Prozessworkflow zur BIM-gestützten Finite-Elemente-Analyse

Um eine vollständige Integration der Tragwerksplanung in den BIM-Prozess zu gewährleisten, wird der Datenfluss in beide Richtungen aufgeführt. Die Daten, die dem Präprozessor des FE-Programms zur weiteren Verarbeitung zugeführt werden, sind die Informationen zum verwendeten Baustoff als alphanumerische Daten und die der statischen Abstraktion zur Erzeugung eines FE-Modells. Der Tragwerksplaner kann nach dem Datentransfer die üblichen Funktionen der FE-Software nutzen und das Modell bearbeiten, erweitern und Bemessungsdurchläufe nachschalten. Die Ausgabeinformationen des Postprozessors zu Schnittgrößen und Bemessungsergebnissen können nun weiterverwendet und/oder dem Building Information Model zugeführt werden, um dessen Informationsgehalt mit den Ergebnissen der Statik anzureichern, oder 3D-Bewehrung auf Grundlage der Daten zu erzeugen. Ein geschlossener BIM-Workflow in der Tragwerksplanung erspart dem planenden Ingenieur dabei die Wiedereingabe des Tragwerksmodells in FE-Software bei gleichzeitiger Sicherstellung der Informationskonsistenz und Zeitersparnis durch automatische Datentransfers. Bei Änderungen der Geometrie im Building Information Model können schnelle Nachrechnungen somit direkt in den Planungsprozess einbezogen und Optimierungen durchgeführt werden.

2.4 Umsetzung der Schnittstelle an einem Minimalbeispiel des Brückenbaus

Da eine vollautomatisierte Schnittstelle zur Anwendung einer BIM-gestützten Finite-Elemente-Analyse im Brückenbau derzeit nicht existiert, wurde diese beispielhaft an einem Minimalbeispiel des Brückenbaus durchgeführt. Hierbei wurde sich der Funktionen der fortgeschrittenen Schnittstelle zwischen den Programmen Autodesk Revit Structure und SOFiSTiK für den Hochbau bedient und alle nötigen Anpassungen für das Beispieltragwerk durch manuelle Änderungen der Datensätze nachgearbeitet.

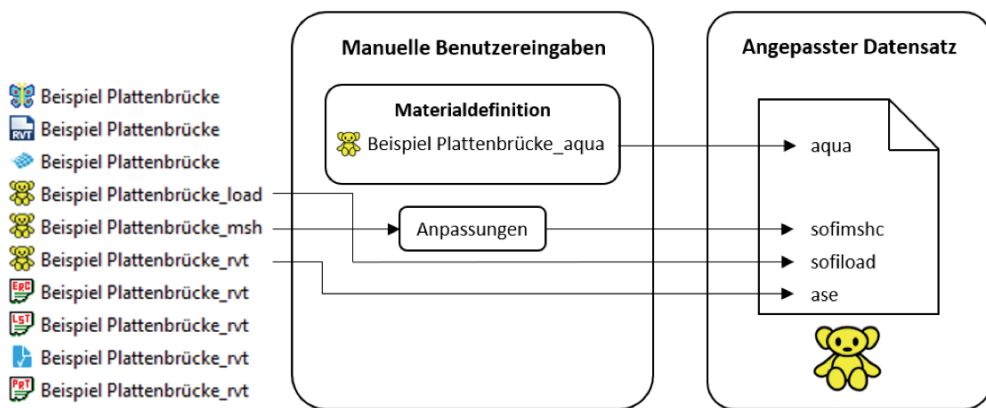


Abb. 4: Beispielhafte Umsetzung der Schnittstelle zur BIM-gestützten Finite-Elemente-Analyse einer Brücke mittels der Programme Autodesk Revit Structure und SOFiSTiK (Links: Ausgabe der Revit-Schnittstelle/ Rechts: Neuer Datensatz als Kombination der angepassten und zusammengeführten Datenpakete der SOFiSTiK-Module)

Das Building Information Model der einfachen Einfeldträgerplatte wurde dabei durch eine Kombination aus Plattenelementen des Hochbaus konstruiert, um die integrierten analytischen Modellelemente zu nutzen. Nach der Eingabe von Lagerungs- und Kopplungsbedingungen sowie eines Eigengewichtslastfalls wurde die interne Schnittstelle zur Übersetzung der Informationen des Modells aus Revit in Datensätze der SOFiSTiK-Datenbank genutzt. Die Ausgabe der Schnittstelle erzeugt Datensätze, die im weiteren Verlauf durch die SOFiSTiK-Oberfläche aufgerufen, genutzt und bearbeitet werden können. Die relevanten Datensätze zur weiteren Bearbeitung liegen hier im Format .dat vor und können somit manuell durch Anpassungen in der CADINP Sprache mit dem SOFiSTiK-Texteditor umprogrammiert werden. Nach den nötigen manuellen Eingriffen in die Materialdefinition bzw. Struktur- und Netzsteuerung können die einzelnen Datenpakete zu einem neuen, angepassten Datensatz zusammengeführt und für Analysen genutzt werden (Abb. 4).

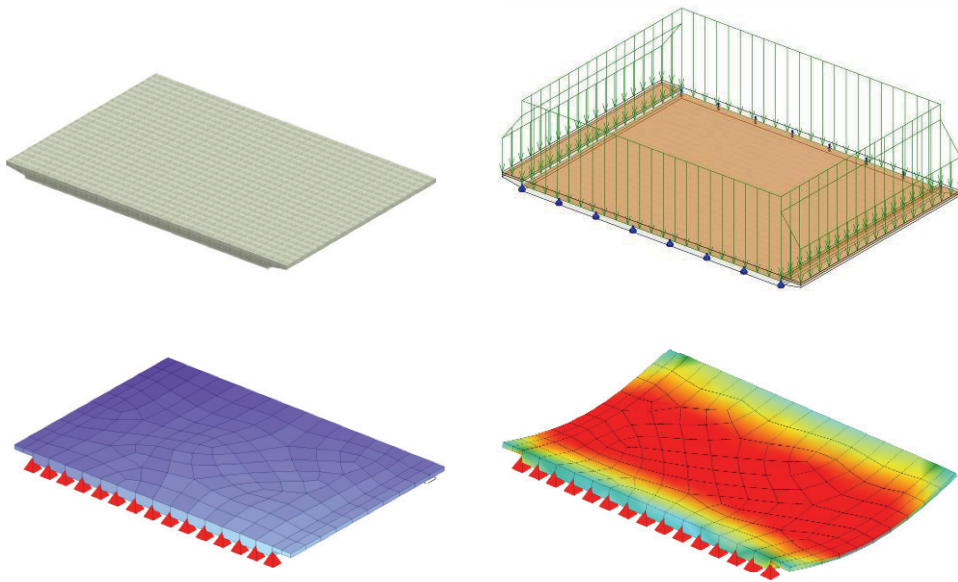


Abb. 5: Building Information Model und analytisches Modell (oben), FE-Modell und BIM-gestützte Tragwerksanalyse unter Eigengewichtslast (unten)

2.5 Ausblick

Die Arbeit mit integrierten analytischen Modellen und automatisierten Schnittstellen in der Tragwerksplanung wird durch das aktuelle Softwareangebot für den Hochbau bereits teilweise ermöglicht. Hier besitzen Standardbauteile wie Stützen, Balken und Decken neben der geometrischen Repräsentation integrierte Stab- und Flächenelemente, dessen Daten zu Querschnittsabmessungen und Bauteildicken sich simultan mit der Veränderung der Modellgeometrie verändern. Aktuelle Entwicklungen zeigen jedoch, dass auch der Brückenbau zukünftig von ähnlichen Funktionen profitieren kann. Hier müssen die komplexen Geometrien des Brückenbaus mit veränderlichen und gekrümmten Formen bereits im Building Information Model gekoppelte analytische Modelle besitzen. Um diese fehlenden Funktionen zu umgehen, lassen sich Standardelemente des Hochbaus bedingt nutzen und durch manuelle Anpassungen mittels Programmierung auf komplexe Geometrien des Brückenbaus anpassen. Aufgrund der Komplexität solcher Adaptionen und des zusätzlichen Programmieraufwandes sind solche Eingriffe allerdings nur temporäre Alternativen bis zur nächsten großen Erweiterung des Softwareangebots.

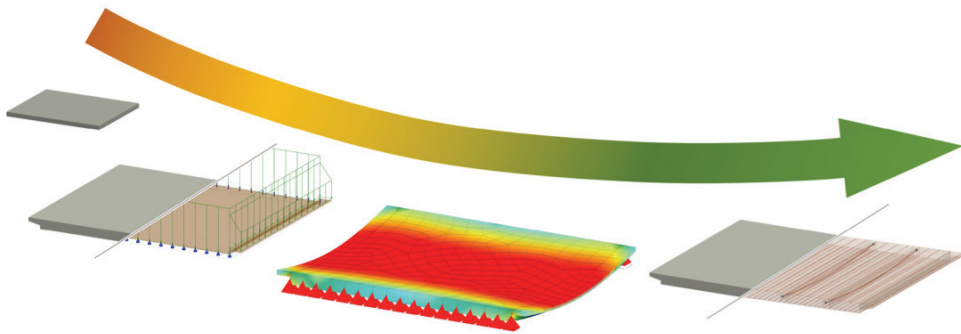


Abb. 6: Darstellung einer vollständig BIM-gestützten Tragwerksplanung im Brückenbau

Literatur

- BORRMANN, A. & KÖNIG, M. (2015), Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden, Springer Vieweg.
- GÜNTHER, W. & BORRMANN, A. (2011), Digitale Baustelle – Innovativer Planen, effizienter Ausführen. Berlin, Springer-Verlag.
- HAUSKNECHT, K. & LIEBICH, T. (2016), BIM-Kompendium - Building Information Modeling als neue Planungsmethode. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag.
- NÖLDGEN, M. (2016), BIM im Brücken- und Ingenieurbau – Digitale Bauwerksmodelle mit NX 10, 3D-Konstruktion, Datenintegration und FE-Simulation. Wiesbaden, Springer-Vieweg.

Konzept eines Digital Twins für Gebäude unter Verwendung von Smart Home Elementen

Mathias Artus

Professur Intelligentes Technisches Design · Bauhaus Universität Weimar · Marienstraße 13a ·
99423 Weimar ·

E-Mail: mathias.artus@uni-weimar.de

Durch die digitale Transformation und dem Internet of Things ändern sich Arbeitsweisen und -prozesse. Zukünftige Absolventen der Ingenieurausbildung benötigen ein breites Wissen im Bereich der digitalen Transformation. Um dies zu vermitteln, wird in dieser Arbeit ein Konzept für einen Digital Twin eines Gebäudes vorgestellt. Dafür werden Sensoren und Aktoren benötigt. Smart-Home-Systeme können dafür verwendet werden. Aufgrund der steigenden Produktionszahlen von Smart-Home-Elementen sinkt deren Preis. Zur Überwachung und Visualisierung können dadurch ganze Gebäude kostengünstig mit Sensoren und Aktoren ausgestattet werden. Bei vielen der proprietären Systeme gibt es keinen Zugriff auf Daten, Programmierung oder Schnittstellen, um eigene Erweiterungen anzubinden. Das entwickelte Konzept löst dieses Problem durch Einsatz einer Middleware. Zu Beginn werden die notwendigen Messgrößen identifiziert. Darauf aufbauend wird ein Systementwurf erstellt. Schließlich wird die Umsetzung beschrieben. An der Professur für Intelligentes Technisches Design wurde das Konzept umgesetzt und getestet. Die Middleware mit allen Aktoren, Sensoren und Schnittstellen läuft erwartungsgemäß und wird aktuell in der Lehre verwendet. Studierende können Projekt- oder Abschlussarbeiten in dem entstandenen Projekt absolvieren.

Keywords: Digital Twin, Smart Home, Virtual Reality, Augmented Reality, Internet of Things

1 Einleitung

Die Anzahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen im Bereich der Digitalen Transformation hat in den letzten Jahren zugenommen. Ingenieure im Flugzeugbau und Prozessingenieure in der Produktfertigung werden zunehmend damit Kontakt haben (NEGRI, E., et al. 2017). Dafür benötigen diese Ingenieure ein Verständnis der zugehörigen Konzepte und Ideen. Arbeitsweisen und Prozesse werden durch die Digitale Transformation nachhaltig verändert werden (CAI, Y. et al. 2017, ROSEN, R. et al. 2015). Die Studierenden sollen mit Hilfe eines virtuellen Abbilds, eines Digital Twins, auf diese neuen Anforderungen vorbereitet werden. Anhand von Projekt- und Abschlussarbeiten in diesem Lehrprojekt sollen Chancen, Grenzen und Probleme dieser Entwicklung aufgezeigt werden.

Ein weiteres Anliegen ist die Verknüpfung von unterschiedlichen Disziplinen in der Lehre. Mit Hilfe des Projektes sollen Studierende lernen, fachübergreifend zu denken. Bei Planung und Entwurf können Darstellungen in der Virtual Reality (VR) hilfreich sein. Somit findet eine Verknüpfung zwischen Architekten, Bauingenieuren und (Medien-)Informatikern statt. Des Weiteren sollen Simulationen, die zum Beispiel durch Bauingenieure durchgeführt

werden, auf einem Tablet darstellbar sein. Den Studierenden wird durch die Interaktion mit anderen Fakultäten und Professuren Methodenkompetenz vermittelt.

Im Folgenden sind die Begriffe Digital Twin und Smart Home erläutert. Danach folgt eine Darstellung des Gesamtkonzeptes und der Umsetzung an der Professur Intelligentes Technisches Design. Abschließend folgt eine Diskussion und Zusammenfassung.

2 Digital Twin

Der Begriff „Digital Twin“ wurde erstmals im Zusammenhang mit Flugzeugbau genannt. Er meint ein möglichst genaues Abbild eines realen Objektes in Form von digitalen Daten (NEGRI, E. et al. 2017). Dabei dienen die gewonnenen Daten numerischen Simulationen und Optimierungen, sowie Visualisierungen. Numerische Simulationen und Optimierungen dienen der Effizienzsteigerung beim Energieverbrauch, während optische Darstellungen in Form von Augmented Reality (AR) oder Virtual Reality (VR) der Visualisierung, z.B. von Planungen oder Simulationsergebnissen, dienen. Im Digital Twin sollen möglichst viele Details des realen Abbildes vorhanden sein. Tabelle 1 zeigt die Elemente, die im Falle eines Gebäudes ausschlaggebend sind.

Tabelle 1: Elemente für den Digital Twin

Element	Geometrie	Messwerte und Attribute
Gebäudeelemente (Wände, Türen, Fenster...)	Form, Position, Größe, Verbindungen, Öffnungen...	Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Licht-Reflektionsverhalten, Feuchtigkeitskapazität, Lichtdurchlässigkeit und -Reflektion,
Mobiliar, Anschlüsse	Form, Position, Größe	
Personen	Position	Wärmeabgabe
Sensoren/Aktoren	Form, Position, Größe	Gemessene Werte
Bewegliche Gegenstände (Rucksäcke, Taschen, Jacken)	Form, Position, Größe	
Luft		Temperatur, rel. Luftfeuchte, Luftdruck, Luftströmung
Licht		Helligkeit, Wärmestrahlung

Geometrien von Wänden, Türen, Fenstern, Mobiliar, Steckdosen, Kabeln Sensoren, Aktoren, Einrichtungsgegenständen sowie beweglichen Gegenständen können im Bauwerkinformationsmodell, z.B. per Industry Foundation Classes (IFC) erfasst werden. Daraus lassen sich 3D-Modelle für die Visualisierung erstellen. Darin können auch Materialparameter wie Lichtdurchlässigkeit, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Licht-Reflektionsverhalten und Feuchtigkeitskapazität gespeichert werden. Messwerte wie Temperatur, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Helligkeit, Wärmestrahlung und Luftströmung können durch Sensoren aufgezeichnet und in einer Datenbank abgelegt werden. Für die Aufzeichnung der Messwerte bieten sich Smart-Home-Systeme an.

3 Smart Home

Unter dem Begriff Smart Home wird in diesem Bereich die Ausstattung von Gebäuden mit Aktoren und Sensoren verstanden, die durch eine zentrale Stelle ausgelesen und gesteuert werden. Dabei können Personen verschiedene Parameter, z.B. Zeiten, Sollwerte und Randbedingungen für Regelungen festlegen. Die Zentrale steuert anhand dieser Parameter die Aktoren. In der ersten Phase werden Thermostate, Heizungsaktoren, Hygrometer und schaltbare Steckdosen verwendet. Eine Auswahl an Herstellern von Smart-Home-Systemen und deren Sparten findet sich bei (FHEM E.V. 2018B). Aus den Marken FS20, HomeMatic, Homematic IP, MAX! und EnOcean bietet nur eine Temperatursensoren, Heizungsaktoren, Schaltaktoren und Lichtsensoren – für spätere Erweiterungen – an. Diese ist HomeMatic IP. Ein zweiter Vorteil von HomeMatic IP ist das geringe Alter der Marke im Vergleich zu den anderen. Deshalb ist eine mehrjährige Verfügbarkeit wahrscheinlicher, als bei den anderen Marken.

Die genannten Markensysteme bieten wenige bis gar keine Schnittstellen für Interaktion bzw. ist die Einarbeitung in die Software sehr zeitaufwändig. Von daher wird eine Middleware verwendet. Anforderungen an die Smart-Home-Middleware sind

- Interaktionsfähigkeit mit verschiedenen Marken der Smart Home Technik
- Nutzerinterface für Konfiguration des Smart-Home-Systems
- Schnittstellen um eigene Software anzubinden
- Quelloffenheit zur Erweiterung mit selbst geschriebenen Modulen

Diese Anforderungen werden von zwei Programmen erfüllt: FHEM (FHEM E.V. 2016; FHEM E.V.) und openHAB (KREUZER, K. 2014). Für die Umsetzung wurde FHEM ausgewählt.

4 Systementwurf

Abbildung 1 zeigt den Entwurf des Gesamtsystems mit allen aktuellen und zukünftigen Elementen. Die blau umrandeten Bereiche beinhalten zukünftige Elemente. Im Zentrum steht die Middleware. Sie ermöglicht die Kommunikation zu Aktoren und Sensoren und zeichnet alle Messdaten auf. Alle anderen Teilnehmer, wie z.B. VR- oder AR-Anwendungen, Simulationen, Optimierungen und Anwendungen für Building Information Modeling (BIM) können über die Middleware auch auf die Aktoren zugreifen.

Die BIM-Software liefert die IFC-Datei mit den geometrischen Daten des Gebäudes und Parametern zu den Bauelementen. Die Daten der IFC-Datei dienen der 3-dimensionalen Darstellung im VR und liefern Informationen über Raumvolumen, Wandparameter, Fenster und mehr für Simulationen und Optimierungen.

In der Datenbank werden alle Mess-, Soll- und Stellwerte aufgezeichnet, um Diagramme zu erstellen sowie Optimierungen der Steuerungen zu berechnen. Die BIM-Anwendung kann auch auf diese Daten zugreifen, um das 3D-Modell auch mit aktuellen Messwerten darzustellen.

Durch eine Kombination von Simulation und VR können vergangene oder zukünftige Zustände der Räumlichkeiten im dreidimensionalen Raum dargestellt werden. Wird noch die Optimierung dazu genommen, können Auswirkungen von neuen Regelalgorithmen visualisiert werden. Die Optimierungssoftware kann über die Middleware die Aktoren einstellen, um Einfluss auf die reale Welt zu nehmen.

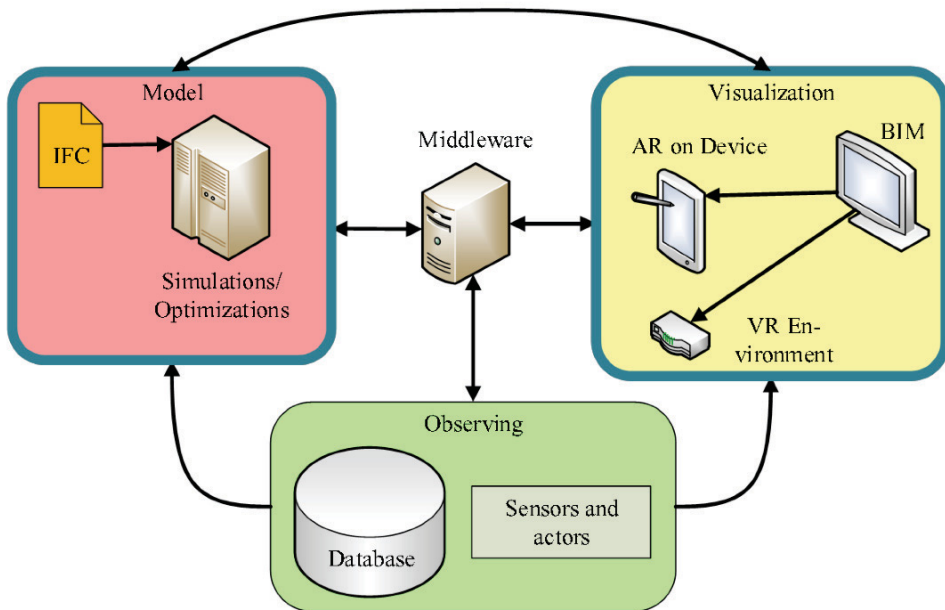


Abb. 1: Gesamtsystem, Blau umrandet sind zukünftige Bereiche

Eine weitere Form der Visualisierung ist die Anzeige von Diagrammen in einer AR-App. Diese stellt auf einem Smartphone oder Tablet die Diagramme zu einem Sensor oder Aktor dar. Dafür wird die Kamera auf einen Marker in der Nähe dieses Elementes gerichtet. Die AR-Software fragt anhand des Markers dann die Daten aus der Datenbank ab und erzeugt die Grafik. Auch hier ist eine Kopplung mit dem Modul zur Simulation und Optimierung denkbar.

5 Umsetzung

Bisher ist der Kern des Systems, die Middleware mit Datenbankanbindung sowie Sensoren und Aktoren, in Betrieb. Als Datenbankmanagementsystem wurde ein relationales System verwendet. FHEM bietet Schnittstellen zu MySQL, SQLite und PostgreSQL. SQLite wird ausgeschlossen, da keine Serverseitigen Scripte möglich sind. MySQL wird perspektivisch in der Form von MariaDB weitergeführt. Da nicht bekannt ist, wie die Entwicklung von statten geht, wird PostgreSQL verwendet.

Die Middleware soll energiesparsam rund um die Uhr laufen. Aus diesem Grund wird ein Raspberry PI 3 B+ nach RASPBERRY PI FOUNDATION (2018) als Serverplattform verwendet. Um die Hardwarekomponenten von HomeMatic IP anzusprechen wird ein USB-transceiver verwendet (MAGENTA SMARTHOME 2016). FHEM ist nicht in der Lage direkt über den Transceiver mit den Smart-Home-Elementen von HomeMatic IP zu kommunizieren. Dies liegt an dem eigens entwickelten Kommunikationsprotokoll der Marke (FHEM E.V. 2017). Dafür ist eine zusätzliche Software, eine virtuelle „CCU“, notwendig. CCU ist der Name der Smart-Home-Zentrale von HomeMatic. Es gibt die Möglichkeit YAHM („Yet Another Homematic Management“) nach KOGAN, L. (2018) oder piVCCU nach REINERT, A. (2017; EQ-3 2015) zu verwenden. Durch das Installationsscript von piVCCU ist die Einrichtung leichter. Deshalb wird piVCCU vorgezogen. Um den USB-Transceiver zu verwenden, muss piVCCU aus dem Entwickler-Branch installiert werden. Im Release-Branch ist der USB-Transceiver nicht unterstützt. piVCCU läuft in einer virtuellen Umgebung und hat eine eigene IP-Adresse. Deswegen muss nach der Installation eine Netzwerkbrücke zu der IP eingerichtet werden. Als letzter Schritt muss die Kommunikationshardware festgelegt werden. Eine detaillierte Anleitung findet sich auf der Website von piVCCU. Ist die Software installiert, kann über einen Aufruf der IP im Browser die Webschnittstelle erreicht werden. Die Software benötigt bis zu 5 Minuten zum Start nach booten des Raspberry. Vorher ist die Website nicht erreichbar. Danach können die Geräte „angelemt“, sprich verbunden, werden. Eine Anleitung dazu findet sich in der Anleitung der CCU bei HomeMatic IP (EQ-3 2016).

Nach der Einrichtung von piVCCU folgt das Setup von FHEM. Auch hier wird ein Installationsscript mitgeliefert. Nach Installation sollten Nutzernamen und Passwort festgelegt werden. Im Anschluss wird begonnen, die Module einzurichten. Eine Übersicht über alle Module, deren Attribute und Funktionsaufrufe findet sich in der Befehlsreferenz (FHEM E.V. 2018A) und im Wiki (FHEM E.V. 2018C). Folgende Module sind für den Betrieb notwendig:

- **HMCCU** ist die FHEM-seitige Schnittstelle zu einer CCU. In diesem Fall piVCCU. Hier werden Einstellungen für die Kommunikation vorgenommen.
- **HMCCUDEV** ist die digitale Repräsentation der Sensoren und Aktoren mit mehreren Kanälen. Alternativ kann HMCCUCHAN verwendet werden. Dies repräsentiert nur einen Kanal eines Sensors bzw. Aktors.
- **DBLOG** dient der Aufzeichnungen von Events in der Datenbank.
- **FHEMWEB** ist die Webschnittstelle für PCs, Smartphones und Tablets.
- **FLOORPLAN** liefert eine Darstellung der Sensoren und Aktoren auf einem Grundriss.
- **TELNET** stellt eine Telnet-Schnittstelle zur Kommunikation von externer Software mit FHEM zu Verfügung.

Nach erfolgreicher Installation lassen sich die Mess- und Stellwerte der Aktoren und Sensoren aufzeichnen und in Grafiken abbilden.

Smart-Home-Systeme können beim Energiesparen unterstützen. Dafür wird zum Beispiel der Energieverbrauch aufgezeichnet und ausgewertet. Abbildung 2 zeigt die Kaffeemaschine in der Küche der Professur Intelligentes Technisches Design. Die Stromversorgung der

Kaffeemaschine läuft über eine Schalt-Messsteckdose – rechts im Bild. Abbildung 3 zeigt den summierten Energieverbrauch der Kaffeemaschine vom 01.06.2018. Klar zu erkennen sind die Stromspitzen, die bei Entnahme eines Kaffees entstehen. Weiterhin werden derzeit Isttemperaturen, Solltemperaturen und Luftfeuchtigkeit der Räume überwacht.



Abb. 2:
Kaffeemaschine mit Schalt-Messsteckdose rechts

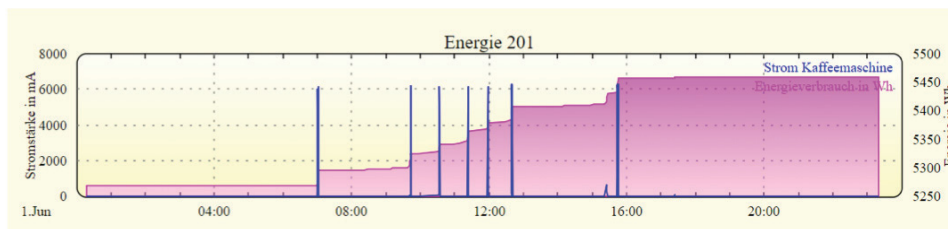


Abb. 3: Energieverbrauch Kaffeemaschine

Nach Einrichtung aller Komponenten wurde sichergestellt, dass:

- manuelle Regelung möglich ist.
- alle Daten korrekt angezeigt und in der Datenbank aufgezeichnet werden.
- Steuerungen regelbasiert definiert werden können.
- Steuerungen manuell beeinflusst werden können.
- Interaktionen per Telnet möglich sind.

6 Diskussion

Auf dem Markt existieren bereits viele Anbieter für Smart-Home-Systeme. Das Smart-Home-Konzept in diesem Dokument zielt auf eine erweiterbare Plattform ab, um weitere Applikationen wie Simulationen, Optimierungen, AR und VR anzubinden. Die verwendete

Middleware, FHEM, erfüllt die Voraussetzungen dafür: sie ist quelloffen und hat viele Schnittstellen. Die Studierenden können eigene Software schreiben und Erfahrungen im Bereich der digitalen Transformation sammeln.

Die Inbetriebnahme benötigte ca. 2 Wochen, ohne Berücksichtigung von Lieferzeiten. Die Installation von FHEM und piVCCU erforderte mehrere Stunden Recherche und Tests. Die Verbindung zu den Sensoren und Aktoren funktionierte ohne nennenswerte Probleme.

Als problematisch stellte sich die Handhabung von FHEM dar. Die Weboberfläche ist für Spezialisten gestaltet und arbeitet mit Befehlen zum Einrichten von neuen Modulen und ändern der Parameter. Eine intuitive Bedienung ist demnach kaum möglich. So müssen z.B. Regeln für zeitgesteuerte Events per Kommandozeile definiert werden.

piVCCU hingegen liefert die grafische Oberfläche von HomeMatic. Diese lässt sich zwar intuitiver bedienen, jedoch ist auch diese nicht für einen Endanwender ohne technisches Verständnis optimiert. Ein Projekt, das auf diesem Smart-Home-System aufsetzt, soll die Anwenderfreundlichkeit untersuchen und verbessern.

Als problematisch stellt sich auch die Stabilität von piVCCU dar. Zu Beginn der Testphase stürzte piVCCU sporadisch nach einigen Tagen Laufzeit ab. Grund hierfür war ein zu schwaches Netzteil. Das Netzteil lieferte wahrscheinlich keine konstante Spannung von 5,1V (REINERT, A. 2018). Nach dem Tausch lief das System ca. 10 Tage fehlerfrei, danach stürzte es erneut ab. Die Fehlersuche ist noch nicht abgeschlossen (Stand 06.08.2018).

Per Telnet können Anwendungen mittels Befehlen, die in FHEM definiert sind, mit FHEM kommunizieren. Somit können per Telnet alle anderen Anwendungen mit FHEM interagieren. Telnet stellt eine unverschlüsselte TCP-Verbindung und damit ein Sicherheitsrisiko dar. Diese Sicherheitslücke soll durch ein weiteres Projekt behoben werden.

Durch die Einbindung der Wetterdaten von Yahoo in FHEM lässt sich objektiv über das Heiz- und Lüftungsverhalten entscheiden. Die Daten von Yahoo weichen von anderen Messdaten ab. Als Vergleich wurden die Wetterdaten der Professur Bauphysik herangezogen (PROFESSUR BAUPHYSIK 2018). Für die Verbesserung der Datengrundlage sollen die Daten der Professur Bauphysik zukünftig verwendet werden.

7 Zusammenfassung

Dieses Paper hat ein Konzept für einen Digital Twin eines Gebäudes unter Verwendung von Smart-Home-Systemen dargestellt. Das System wird in der Lehre verwendet, um Studierenden Erfahrungen im Bereich digitale Transformation und Internet of Things zu ermöglichen. Nach der Erläuterung der Begriffe Digital Twin und Smart Home wurde das Konzept mit seinen Komponenten vorgestellt und die Umsetzung erläutert. Darauf folgte ein Funktionstest der Hausautomatisierung und der Schnittstellen in FHEM. Aus der abschließenden Diskussion ist die Eignung des Systems für die Lehre hervorgegangen sowie erste Projektdefinitionen für Studentenprojekte, die Verbesserungen des Gesamtsystems umsetzen sollen.

Literatur

- CAI, Y., et al. (2017), Sensor Data and Information Fusion to Construct Digital-twins Virtual Machine Tools for Cyber-physical Manufacturing, In: *Procedia Manufacturing*, 1031–1042.
- EQ-3 (2014), www.eq-3.de/produkte/max.html (30.05.2018).
- EQ-3 (2015), www.eq-3.de/produkte/homematic/zentralen-und-gateways/homematic-zentrale-ccu-2.html (30.05.2018).
- EQ-3 (2016), www.homematic.com/Downloads/eq3/download%20bereich/handbuecher/HomeMatic_WebUI_Handbuch_eQ-3.pdf (21.07.2018).
- FHEM E.V. (2016), www.fhem.de (30.05.2018).
- FHEM E.V. (2017), www.forum.fhem.de/index.php/topic,83376.msg756115.html#msg756115 (21.07.2018).
- FHEM E.V. (2018A), www.commandref.fhem.de (21.07.2018).
- FHEM E.V. (2018B), www.wiki.fhem.de/wiki/Systemübersicht (30.05.2018).
- FHEM E.V. (2018C), www.wiki.fhem.de/wiki/Hauptseite (21.07.2018).
- KOGAN, L. (2018), [www.github.com/leonsio/YAHM](https://github.com/leonsio/YAHM) (21.07.2018).
- KREUZER, K. (2014), www.openhab.org (30.05.2018).
- MAGENTA SMARTHOME (2016), www.smarthome.de/geraete/eq3-smarthome-funkstick-fuer-homematic-ip?gclid=EAIaIqobChMlpYjGoo6t2wIVDUPTCh1EZQg1EAQYASABEgJU5PD_BwE&mlid=2165.1010.1155536.c43755b0586a36ddff2fdf917bd3c94f...0.1527672228.1.1530264228&vb=google&vo=Y0289&wt_mc=sg_smo_1155536_fn-sh-360661449-23277163929-83176664889- (30.05.2018).
- NEGRI, E., et al. (2017), A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems, In: *Procedia Manufacturing*, 939–948.
- PROFESSUR BAUPHYSIK (2018), www.wetter-weimar.de/ (30.05.2018).
- RASPBERRY PI FOUNDATION (2018), www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/ (30.05.2018).
- REINERT, A. (2017), [www.github.com/alexreinert/piVCCU](https://github.com/alexreinert/piVCCU) (30.05.2018).
- REINERT, A. (2018), [www.github.com/alexreinert/piVCCU/issues/54](https://github.com/alexreinert/piVCCU/issues/54) (21.07.2018).
- ROBERT BOSCH SMART HOME GMBH (2017), www.bosch-smarthome.com/de/de (30.05.2018).
- ROSEN, R. et al. (2015), About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing, In: *IFAC-PapersOnLine*. 3, 567–572.

Das Angebot der TU9 im Bachelor-Studiengang Bauingenieurwesen zur angewandten Informatik

Paul Merz¹ und Laura Böger²

Fachgebiet Bauinformatik · Technische Universität Berlin · Gustav-Meyer-Allee 25 · 13355 Berlin ·

¹E-Mail: paul.merz@campus.tu-berlin.de

²E-Mail: laura.c.boeger@tu-berlin.de

Universitäten und Hochschulen kommt bei der Aus- und Weiterbildung zu Hintergründen und Arbeitsweisen mit digitalen Modellen eine Schlüsselrolle zu. In dieser Arbeit wird ein Überblick gegeben, in welcher Form Fachwissen und Fähigkeiten im Umfeld der angewandten Informatik als Basis der Digitalisierung im Rahmen von Bachelor-Studiengängen des Bauingenieurwesens an den TU9 Universitäten in Deutschland vermittelt und erworben werden. Dabei werden insbesondere Grundlagen und weiterführende Themenschwerpunkte der Informatik im Bauwesen betrachtet. Die verschiedenen Curricula werden gegenübergestellt und Unterschiede werden aufgezeigt, um einen detaillierten Überblick der Antworten der TU9 auf die angesichts der Digitalisierung geänderten Rahmenbedingungen im Bauingenieurwesen zu geben.

Keywords: Lehre, Building Information Modeling, Finite Elemente Methode, Simulation und Modellierung

1 Einleitung

Die Digitalisierung führt in allen Bereichen der Wirtschaft zu Veränderungen, wovon auch das Bauwesen nicht ausgenommen bleibt. Aktuell steht dabei der Begriff Building Information Modeling (BIM) für das Erstellen, Auswerten und gegebenenfalls Ändern digitaler Gebäudemodelle im Zentrum. Um das Potential dieser neuen Entwicklungen ausschöpfen zu können, ist die Baubranche auf speziell im Bereich Bauinformatik qualifizierte Absolventen angewiesen, weshalb die Universitäten eine Schlüsselrolle einnehmen. Diese Arbeit soll deshalb als Teil einer Bachelorarbeit am Fachgebiet Bauinformatik der Technischen Universität Berlin einen Überblick über das Angebot der TU9 Universitäten liefern und diese vergleichen. Um einerseits den Rahmen dieser Arbeit nicht zu überschreiten und andererseits dennoch einen möglichst hohe Repräsentativität zu gewährleisten, wurde das Untersuchungsfeld auf die TU9 Hochschulen eingeschränkt. Diese umfassen die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), die Technische Universität Berlin (TUB), die Technische Universität Braunschweig (TUBs), die Technische Universität Darmstadt (TUDA), die Technische Universität Dresden (TUDd), die Leibniz Universität Hannover (LUH), das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die TU München (TUM) und die Universität Stuttgart (US). Im folgenden Kapitel wird zunächst das betrachtete Spektrum anhand einer Definition des Begriffes Bauinformatik eingeschränkt, woraufhin die in diese Definition fallenden Module kurz dargestellt werden. Im dritten Kapitel werden die Differentiationskriterien vorgestellt, anhand derer die verschiedenen Module im vierten Abschnitt inhaltlich gruppiert und verglichen werden. Das fünfte Kapitel fasst die Ergebnisse zusammen.

2 Module in der Bauinformatik

2.1 Begriffsdefinition

Die in dieser Arbeit betrachteten Module haben alle einen Bezug zur computergestützten Lösung von Problemen im Bauwesen. Einerseits vermitteln sie Grundlagen, auf deren Basis die Einsatzmöglichkeiten von Computern und -netzen erkannt und eingeschätzt werden können, andererseits bieten sie Einblicke in die verschiedenen Anwendungsbereiche des Computers. Kurse mit Hauptfokus auf bauwirtschaftliche und baubetriebliche Aspekte werden nicht betrachtet.

2.2 Übersicht der Module

Im Folgenden werden Module des Studiengangs Bauingenieurwesen der TU9 betrachtet.

Die Angebote dieser Universitäten können anhand unterschiedlicher Kriterien verglichen werden, welche den Modullisten der jeweiligen Einrichtung entnommen wurden. Einerseits kann ein Vergleich in Bezug auf die Inhalte (siehe Kapitel 4 Inhalte), andererseits aber auch hinsichtlich der Gewichtung innerhalb der Curricula (siehe **Tabelle 1**) vorgenommen werden. So bietet die Leibniz Universität Hannover sieben Module mit insgesamt 36 Leistungspunkten (LP) an, am KIT hingegen gibt es zwei Module mit insgesamt 4 LP. Das Modul „Bauinformatik I“ ist im Pflichtbereich, wodurch die Bauinformatik im Bauingenieurstudium am KIT mit lediglich 2 LP vertreten ist. Den größten Anteil am Pflichtstudium gibt es an den Technischen Universitäten in Berlin und Braunschweig und an der Leibniz Universität Hannover mit je 12 LP. Nicht alle Universitäten haben ein eigenes Fachgebiet Bauinformatik, so sind die Module des KIT beispielsweise beim Institut für Hydromechanik beheimatet. Ein Überblick über Module und Fachgebiete der Universitäten kann in **Tabelle 1** gewonnen werden. Zu beachten ist, dass an der TU Dresden ein Diplomstudiengang angeboten wird und Fernstudiengänge nicht berücksichtigt werden

Tabelle 1: ECTS-Punkte in Bauinformatik-Fächern

Univer- sität	Anzahl Module	LP gesamt	LP Pflicht	LP Wahl	Fachgebiet
RWTH	3	9	3	6	Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme
TUB	3	18	12	6	Fachgebiet Bauinformatik
TUBs	5	30	12	18	Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen
TUDa	2	12	6	6	Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen
TUDd	5	33	9	24	Institut für Bauinformatik
LUH	7	36	12	24	Institut für Risiko und Zuverlässigkeit
KIT	2	4	2	2	Institut für Hydromechanik
TUM	3	15	10	5	Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation
US	1	6	6	0	Institut für Werkstoffe im Bauwesen

3 Differentiationskriterien

Bei der Recherche wurde eine Reihe von Kriterien gesammelt, nach denen die verschiedenen Module verglichen werden können. Dazu zählen quantitative Größen wie die Anzahl der Semesterwochenstunden (SWS) sowie deren Aufteilung auf die drei üblichen Lehrformen Vorlesung (VL), Übung (UE) und Tutorium (TUT), die Anzahl der Leistungspunkte nach dem European Credit Transfer and Accumulation System (ECTS) und das Semester, in dem das Modul beim Studium in Regelstudienzeit zu belegen ist. Daneben kann eine Unterteilung in Pflicht- bzw. Wahlkurse vorgenommen werden. Zu den weicheren Unterscheidungskriterien gehören die Ziele der Veranstaltung, die Inhalte sowie Prüfungsformen, welche zunächst den Modulbeschreibungen entnommen und bei Bedarf bei Modulverantwortlichen erfragt wurden.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Kurse nach den Inhalten gruppiert, wobei zunächst die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Kategorie begründet wird. Darauf erfolgt ein Vergleich der Module einer Inhaltsgruppe nach den anderen zuvor erwähnten Kriterien. Die inhaltliche Einteilung erfolgt im ersten Schritt auf Basis des POSITIONSPAPIERS DES ARBEITSKREIS BAUINFORMATIK (2016) in Grundlagen, numerische Methoden und weiterführende Lehrveranstaltungen, die wiederum auf Basis der Inhalte in proprietäre Software und BIM unterschieden werden. Neben den genannten bieten die Fachgebiete weitere Module an, welche sich mit Modellbildung und Anwendung in anderen Bauingenieursfächern befassen. Diese werden im Folgenden nicht weiter betrachtet. Ebenso werden zwei Module des Diplomstudiengangs der TU Dresden nicht besprochen, da diese im Vergleich mit den anderen Universitäten dem Masterbereich zugeordnet werden. Um einen Überblick über die Einordnung zu geben, werden nun die vier identifizierten Gruppen kurz definiert:

Grundlagen:	Grundlagen der Programmierung und Informatik anhand einer objektorientierten Programmiersprache, Algorithmen, Datenstrukturen, Grundlagen grafischer Benutzeroberflächen
Numerische Methoden/Finite Elemente Methode (FEM):	Grundlagen für das Verständnis moderner FEM-Software legen und Grenzen bzw. Fehler einschätzen, Programmierung einer eigenen FEM-Anwendung; numerische Interpolation, Differentiation und Integration
proprietäre Software:	Anwendung bestehender Software, vor allem CAD
Building Information Modeling:	Erstellung und Auswertung von Gebäudemodellen, Theoretische Grundlagen zu geometrischer Modellierung und Austauschformaten

4 Inhalte

Im Folgenden werden die Module in die identifizierten Inhaltskategorien eingeordnet und dort anhand der weiteren Differentiationskriterien untereinander verglichen. Die Inhalte der Module wurden den Modulbeschreibungen der jeweiligen Universitäten entnommen, diese sind im Literaturverzeichnis zu finden.

4.1 Grundlagen

Module dieser Kategorie sind in fast allen betrachteten Universitäten als Pflichtmodule vertreten, lediglich an der Leibniz Universität Hannover werden die Themen dieser Kategorie nur in einem Wahlmodul gelehrt. Die Module sind unterschiedlich stark mit anderen Themen kombiniert. So behandelt beispielsweise der Kurs „Grundlagen der Bauinformatik“ der TU Berlin die in der Einleitung genannten Inhalte ausschließlich und stellt vor Allem anhand von Aufgabenstellungen in Tutorien und Hausaufgaben den Bezug zum Bauingenieurwesen her. Auch die Module „Einführung in die Bauinformatik und Programmierung“ an der RWTH Aachen und „Bauinformatik I“ am KIT lassen sich zu dieser Gruppe der „reinen“ Grundlagenkurse zählen.

Daneben gibt es Kurse, die die Grundlagen der Bauinformatik in Kombination mit einer anderen Thematik lehren, wofür das Modul „Bau- und Umweltinformatik I“ der TU München ein Beispiel ist. Dort wird neben den Inhalten der oben genannten Kurse auch auf Tabellenkalkulation, Computer Aided Design (CAD) und BIM eingegangen. Auch an der TU Darmstadt erfolgt im Modul „Grundlagen der Ingenieurinformatik“ eine Kombination mit fachspezifischer Software. An der TU Braunschweig dagegen werden die Inhalte im Modul „Ingenieurmathematik und –programmierung“ zusammen mit den Grundlagen der Numerik und der Finite-Differenzen-Methode gelehrt. Die Leibniz Universität Hannover strebt im Modul „Grundlagen der digitalen Bauwerksmodellierung“ eine grundlegende Lehre dieser mit BIM verknüpften Thematik mithilfe einer objektorientierten Implementierung in Java an. Die TU Dresden stellt im Kurs „Algorithmen und Datenstrukturen in Java“ speziell die Verknüpfung mit bestehender Software in den Vordergrund

Aufbauend gibt es an einigen Hochschulen Kurse, die Grundlagen vertiefen und erweitern. Diese sind im Wahlbereich angesiedelt und umfassen Kurse wie „Bauinformatik II“ am KIT, welcher vertieft auf Klassen und Vererbung, aber auch die Fehlerbehandlung eingeht. Weitere Beispiele sind „Bauinformatik vertiefte Grundlagen“ an der TU Dresden mit großer Bandbreite von der Graphentheorie bis zu XML und Grundlagen der Systemtheorie sowie „Bau- und Umweltinformatik II“ der TU München, welches neben der Graphentheorie auch Listen und deren Sortierung und die Zeitkomplexität von Algorithmen zum Thema hat.

Inhaltliche Gemeinsamkeit aller Kurse in dieser Kategorie ist die Lehre der Inhalte mithilfe einer Programmiersprache bzw. des Programmes MathWorks Matlab. Etwa die Hälfte der Module bietet Tutorien an, in denen die Arbeit mit dieser Programmiersprache am PC den Studierenden praktisch nähergebracht wird. Teilweise sind diese Tutorien mit einer Prüfungsvorleistung kombiniert, so gibt es am KIT drei Übungsaufgaben, welche im Rahmen der Programmierpraktika richtig gelöst werden müssen, um für die Klausur zugelassen zu werden. An der RWTH herrscht hingegen lediglich eine Anwesenheitspflicht bei den Kleingruppenübungen.

Die Prüfungsleistungen bestehen im Allgemeinen bei allen betrachteten Modulen aus einer schriftlichen Prüfung, welche wie bereits angesprochen mit Prüfungsvorleistungen oder gleichrangigen Leistungen kombiniert wird. An der TU München und der TU Berlin sind vier bzw. drei Hausaufgaben zu bearbeiten, welche zusammen mit einem Test eine Note bilden, wohingegen die Übungsaufgaben an der Universität Stuttgart als reine Zulassung zur Endprüfung gelten. Besonderheit an der RWTH ist, dass sowohl die drei Übungsleistungen als auch das 30-minütige schriftliche Testat unbenotet sind.

Module dieser Inhaltskategorie werden als Pflichtkurse meist in den ersten Semestern gelehrt, die Kurse der TU Berlin und TU Darmstadt sind im dritten Semester vorgesehen. Große Unterschiede gibt es bei der Gewichtung der Kurse nach LP, so reicht die Spanne von lediglich 2 ECTS-Punkten am KIT bis zu 8 an der TU Braunschweig. Dies widerspiegelnd verteilen sich auch die SWS in einer Spanne von 2 am KIT und der TU Dresden bis zu 7 an der TU Braunschweig.

Tabelle 2: Module der Kategorie Grundlagen

Universität	Modul	Wahl/Pflicht	LP	Semester
KIT	Bauinformatik I	Pflicht	2	1.
KIT	Bauinformatik II	Wahl	2	2.
LUH	Grundlagen der digitalen Bauwerksmodellierung	Wahl	6	6.
RWTH	Einführung in die Bauinformatik und Programmierung	Pflicht	3	1.
TUB	Grundlagen der Bauinformatik	Pflicht	6	3.
TUBs	Ingenieurmathematik und Programmierung	Pflicht	8	2.
TUDa	Grundlagen der Ingenieurinformatik	Pflicht	6	3.
TUDd	Algorithmen und Datenstrukturen in Java	Pflicht	5	1. und 2.
TUDd	Bauinformatik vertiefte Grundlagen	Wahl	8	-
TUM	Bau- und Umweltinformatik I	Pflicht	5	1.
TUM	Bau- und Umweltinformatik II	Pflicht	5	2.
US	Statistik und Informatik	Pflicht	6	1.

4.2 Numerische Methoden/FEM

Einen weiteren verbreiteten Lehrinhalt bilden die numerischen Methoden, die eine Grundlage für moderne Finite-Elemente-Software bilden. Module, die diesen Stoff behandeln gibt es an fünf der neun betrachteten Universitäten, wobei ähnlich wie im vorangegangenen Abschnitt noch eine feinere inhaltliche Differenzierung vorgenommen werden kann.

An der Leibniz Universität Hannover gibt es zwei Kurse in diesem Feld. Einerseits den Pflichtkurs „Computergestützte Numerik für Ingenieure“, welcher im 2. Fachsemester mithilfe von Matlab die numerische Lösung verschiedener Probleme mit Bezug auf Gleichungssysteme und Differentialgleichungen behandelt. Andererseits wird im 5. Semester das Wahlmodul „Numerische Mechanik“ angeboten, welches den Fokus auf die Methode der Finiten Elemente legt. Dort wird auch mit einer kommerziellen FEM-Software gearbeitet, wobei die Grundlagen anhand einer überschaubaren Implementierung in Matlab gelegt werden. Das Angebot der RWTH Aachen umfasst im Bachelor den Wahlkurs „Introduction to Scientific Computing I“, in dem eine Einführung in numerische Lösungsverfahren mithilfe von Matlab gegeben wird. An der TU Berlin gibt es im 4. Fachsemester aufbauend auf dem Grundlagenkurs das für den Bachelorstudiengang verpflichtende Modul „Numerische Methoden im Bauingenieurwesen“, das sowohl die drei Verfahren der Interpolation, Differentiation und Integration, als auch ein in Java programmiertes FEM-Programmsystem zum Thema hat.

Einen besonderen Schwerpunkt auf die Lehre in diesem Bereich legt die TU Braunschweig, was sich in den drei dort angebotenen Kursen zeigt. Im 2. Semester gibt es den bereits im

vorigen Abschnitt erwähnten Kurs „Ingenieurmathematik und Programmierung“, in dem neben den programmiertechnischen Grundlagen aber auch die numerische Lösung von Differentialgleichungen und die Finite-Differenzen-Methode behandelt werden. Darauf im 4. Semester folgend gibt es den Pflichtkurs „Numerische Ingenieurmethoden“, der die Standardthemen dieser Inhaltskategorie lehrt. Abschließend werden dann im 6. Semester die erlernten Grundlagen im Wahlfach „Numerische Methoden in C++“ objektorientiert implementiert.

An der TU Dresden gibt es den Pflichtkurs „Informationsmanagement und Numerische Mathematik“, welcher neben Lösungsalgorithmen für Gleichungssysteme und Approximations- bzw. Interpolationsverfahren einen weiteren Schwerpunkt auf die für Interoperabilität notwendige Strukturierung von Informationen legt.

Tabelle 3: Module der Kategorie Numerische Methoden/FEM

Univer- sität	Modul	Wahl/ Pflicht	LP	Semester
LUH	Computergestützte Numerik für Ingenieure	Pflicht	5	2.
LUH	Numerische Mechanik	Wahl	6	5.
RWTH	Introduction to Scientific Computing I	Wahl	3	-
TUB	Numerische Methoden im Bauingenieurwesen	Pflicht	6	4.
TUBs	Numerische Ingenieurmethoden	Pflicht	4	4.
TUBs	Numerische Methoden in C++	Wahl	6	6.
TUDd	Informationsmanagement und Numerische Mathematik	Pflicht	4	5. und 6.

4.3 Proprietäre Software

Lediglich an der Leibniz Universität Hannover gibt es einen Pflichtkurs zum Thema CAD, welcher im 3. Semester gelehrt wird. Die RWTH Aachen und die TU Darmstadt bieten die Thematik im Wahlbereich an, wobei erstere mit der Software MicroStation von Bentley Systems den Fokus stark auf die zeichnerische Komponente der Arbeit legt, während letztere auch auf Themen der Schnittstellen und Interoperabilität eingeht. An den Technischen Universitäten in Berlin und München gibt es hingegen in Zusammenarbeit mit dem Anbieter Nemetschek Kurse in der Software Allplan, welche allerdings kein Bestandteil des Studienverlaufsplans sind und somit keine LP erbringen.

Tabelle 4: Module der Kategorie proprietäre Software

Universität	Modul	Wahl/Pflicht	LP	Semester
LUH	CAD für Bauingenieure	Pflicht	2	3.
RWTH	Einführung in CAD	Wahl	3	2.
TUB	CAE im Konstruktiven Ingenieurbau	Wahl	0	-
TUDa	Datenbanken für Ingenieur Anwendungen	Wahl	6	-
TUM	Softwareschulung BIM	Wahl	0	-

4.4 Building Information Modeling

Zwei Universitäten bieten Wahlmodule mit speziellem Fokus auf BIM an. Dies ist einerseits die TU Berlin, welche im gleichnamigen Modul einen Workflow von der Modellerstellung in Autodesk Revit bis zur Erstellung des Leistungsverzeichnisses in RIB iTWO behandelt. Dies geschieht anhand von Hausaufgaben, die die Studierenden einzeln abgeben und präsentieren müssen. Theoretische Grundlagen wie geometrische Modellierung, Kollisionskontrolle und Austauschformate werden in Vorlesungen gelehrt, während die beiden behandelten Programme im Rahmen von PC-Übungen vorgestellt werden.

Das Modul der TU München behandelt neben der Erstellung und Auswertung von Gebäudemodellen auch die Anwendung der Finite-Differenzen-Methode auf solche. Die Studierenden erstellen semesterbegleitend ein Gebäudemodell, welches kontinuierlich erweitert und wöchentlich überprüft wird. Zudem findet zum Ende des Semesters eine mündliche Prüfung statt.

Weiterhin werden Inhalte zum Thema BIM an verschiedenen Universitäten innerhalb anderer Module gelehrt. Dazu zählen z. B. die bereits zuvor angesprochenen Kurse „Einführung in CAD“ an der RWTH Aachen, welches auch die Software Bentley AECosim Building Designer als Thema hat sowie „Grundlagen der digitalen Bauwerksmodellierung“ der Leibniz Universität Hannover.

Tabelle 5: Module der Kategorie Building Information Modeling

Universität	Modul	Wahl/Pflicht	LP	Semester
TUB	Building Information Modeling (BIM)	Wahl	6	5., 6.
TUM	Bau- und Umweltinformatik Ergänzungsmodul	Wahl	5	5.

5 Zusammenfassung

Die Aussage von KÖNIG et. al. (2015), dass Grundlagenwissen der angewandten Informatik „an nahezu allen Universitäten im deutschsprachigen Raum vermittelt“ wird, kann auf Basis der Betrachtung der TU9 bestätigt werden. Die Inhalte dieser Kurse sind ähnlich und alle arbeiten entweder mit einer Programmiersprache oder Matlab zur Anwendung der Lehrinhalte. Die weiteren Schwerpunkte sind weniger durchgehend verbreitet und zeigen spezifische Ausrichtungen einzelner Universitäten, wobei auf dem Vorwissen aus Grundlagenkursen aufgebaut wird. Numerische Methoden und FEM sind oftmals Bestandteil des Pflichtteils und werden dann in einigen Fällen auf fächerübergreifende Probleme angewendet. BIM hat schon an einigen Universitäten Einzug als Wahlmodul gehalten, ist aber nur sehr begrenzt innerhalb anderer Fächer im Pflichtbereich der Curricula vertreten. An einigen Hochschulen wird zudem proprietäre Software in Bezug auf CAD und BIM gelehrt. Insgesamt zeigt sich eine starke Verschiedenheit in der Verankerung der Bauinformatik in den Curricula, was schon anhand der Leistungspunkte und Fachgebiete zu belegen ist. In allen Kursen wird die Erlangung der Fähigkeiten über Prüfungsleistungen evaluiert, die aus Hausaufgaben und/oder schriftlichen oder mündlichen Tests bestehen. Das Angebot der Masterstudiengänge, welches weitere Angebote im Bereich der angewandten Informatik beinhaltet, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Literatur

- SMARSLY, K., HARTMANN, T., RÜPPEL, U. & KÖNIG, M. (2016), Positionspapier des Arbeitskreis Bauinformatik, German Association of Computation in Civil Engineering (GACCE), Hannover.
- KÖNIG, M., RANK, E., BLETZINGER, K., BORRMANN, A., SMARSLY, K., HUHN, W. (2015), Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen der Bauinformatik, Bauingenieur.
- RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN (2015), Studiengangsspezifische Prüfungsordnung für den Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, www.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaappxje (20.6.2018).
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN (2015), Bauingenieurwesen-Studien- und Prüfungsordnung 2015, www.moseskonto.tu-berlin.de/amos/modultransfersystem/studiengaenge/anzeigen.html?id=36 (20.6.2018).
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG (2018), Beschreibung des Studiengangs Bauingenieurwesen (PO WS 2016/17), www.fk3-documents.tu-bs.de/Bau/bau-bsc-modulhandbuch_2018-04-04.pdf (20.6.2018).
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT (2014), Modulhandbuch des Bachelor-Studiengangs Bauingenieurwesen und Geodäsie (B. Sc.), www.bi.tu-darmstadt.de/media/fachstudienberatung_bauingenieurwesen/downloadsundlinks/aktuelle_downloads/bsc_bauingenieurwesen_und_geodaesie_so_2014/2_studienordnung_und_ausfuhrungsbestimmung_4/Modulhandbuch_BSc_BIG_FB13_TUD.pdf (20.6.2018).
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN (2018), Prüfungsordnung für den Diplom-Studiengang Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Dresden, www.tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/ressourcen/dateien/studium/ordner_daten/shg/BIW_PO_Diplom_grundstaendig_2015_08_10_AB.pdf?lang=de (20.6.2018).
- LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER (2015), Modulhandbuch zur Prüfungsordnung 2015 für den Studiengang Bau- und Umweltingenieurwesen (B. Sc.), www.fbg.uni-hannover.de/fileadmin/fakultaet/Dateiverzeichnis/Studierende/Modulkataloge/Modulhandbuch_BU.pdf (20.6.2018).
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN (2016), Fachprüfungs- und Studienordnung für den Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München, www.bgu.tum.de/fileadmin/w00blj/bau/2_Studium/2_4_Fachpruefungsordnungen/BI-Bachelor-FPSO_20161.pdf (20.6.2018).
- KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (2018), Modulhandbuch Bauingenieurwesen (B. Sc.), www.bgu.kit.edu/download/mhb_bau-ba-SPO2017_de.pdf (20.6.2018).
- UNIVERSITÄT STUTTGART (2018), Modulhandbuch Studiengang Bachelor of Science Bauingenieurwesen, www.uni-stuttgart.de/bologna/modulhandbuecher/SoSe2018/MHB_82-017-2017-1.pdf (20.6.2018).

Session 3:

Informationsverwaltung und Datenmodellierung 1

Herausforderungen bei der Akquirierung, Übertragung, Bereitstellung und Qualitätssicherung von großen Monitoringdatenmengen

Alexander Miehl¹, Ben Krämer² und Christoph Wirtz³

Institut für Energieeffizientes Bauen – E3D · RWTH Aachen University · Mathieustraße 30 ·
52074 Aachen ·

¹E-Mail: miehlich@e3d.rwth-aachen.de

²E-Mail: kraemer@e3d.rwth-aachen.de

³E-Mail: wirtz@e3d.rwth-aachen.de

Sanierungsmaßnahmen von Gebäuden und Stadtquartieren sind ein Instrument um die ehrgeizigen Klimaziele der Bundesregierung zu erreichen. Die Effizienz von Maßnahmen in geförderten Umsetzungsprojekten muss durch ein detailliertes Monitoring nachgewiesen werden. Zum Zweck der weiteren Verwendbarkeit der Messdaten innerhalb von anderen Forschungsprojekten wird im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN eine zentrale Messdatenbank zur Speicherung erhobener Messdaten entwickelt.

Im Rahmen dieses Beitrages wird der angestrebte Arbeitsweg dargestellt, den die erhobenen Monitoringdaten verschiedener Forschungsprojekte durchlaufen müssen, um die Basis für eine einheitliche und strukturierte Datenbank zu bilden. Die Übertragung dieser Daten zur Speicherung in der Messdatenbank stellt den ersten Aufgabenbereich dar. Eine erfolgreiche Übertragung von großen Datenmengen muss auch bei unbekannten Übertragungsgeschwindigkeiten und Leitungsqualitäten mit Hilfe geeigneter Instrumente sichergestellt werden.

Nach der Übertragung erfolgt eine Qualitätssicherung. Die Zuteilung eines vereinheitlichten Schlüssels der Sensorbezeichnung auf zukünftige Monitoringprojekte soll dabei für eine fortlaufende Konsistenz in der Messdatenbank sorgen. Zum einen ist eine Prüfung auf Plausibilität der Datensätze zur Vermeidung grober Fehler anzusetzen, was durch die Größe der Datenmengen nur automatisiert erfolgen kann. Zum anderen steht über den genannten technischen Herausforderungen in jedem Fall auch der Aspekt des Datenschutzes. Kritische Daten im Sinne des Datenschutzes sind insbesondere jene Informationen, die bei geeigneter Auswertung Rückschlüsse auf die Privatsphäre von Personen zulassen könnten.

Keywords: Messdatenbank, Monitoring, Qualitätssicherung, Begleitforschung, Datenspeicherung

1 Einleitung

Ein Ziel der wissenschaftlichen Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN ist neben dem Gewinnen neuer Erkenntnisse aus dem Monitoring verschiedener Forschungsprojekte auch die lokale Bereitstellung dieser Monitoringdaten für weitere Forschungszwecke von anderen Institutionen (BMW 2016). Das Gebäudemonitoring wird in den meisten Fällen über Sensoren realisiert, die je nach Forschungsschwerpunkt des Projektes unterschiedliche Facetten des Forschungsgegenstandes observieren. In jedem Fall werden die Sensor- oder

Messdaten in eine Form gebracht, die für das Forschungsprojekt von maximalem Nutzen ist. Bei der Betrachtung zweier Projekte mit ähnlichem Schwerpunkt, können dadurch bereits deutliche Unterschiede in der Gestalt der Monitoringdaten, in der Dokumentation dieser Daten und in dem Dateiformat auftreten.

Neben diesen Unterschieden in den Metadaten kann sich auch die Datenmenge stark unterscheiden. Die Anzahl der verwendeten Sensoren sowie die eingestellte zeitliche Auflösung der Abtastung sind hierbei ausschlaggebend. Eine große Datenmenge führt zu einer weiteren Herausforderung bei der Übertragung der Daten auf die geplante Messdatenbank. Es sind daher geeignete Mechanismen gefragt, welche die Vollständigkeit, die Plausibilität und den Schutz der übertragenen Daten sicherstellen. Auf Seiten der Datenbank muss weiterhin das aktuell geltende Datenschutzgesetz für den regulierten Umgang mit diesen Monitoringdaten in der Forschung umgesetzt werden.

Es ist ersichtlich, dass die Umsetzung der Monitoringdatenbank eine komplexe Arbeitskette erfordert, die bei der Akquirierung der Daten beginnen und bei der rechtlich abgesicherten Bereitstellung der Daten auf der Datenbank enden muss. Durch die besondere Stellung der wissenschaftlichen Begleitforschung als verbindendes Glied zwischen Monitoringprojekten und interessierten Institutionen, entsteht eine große Verantwortung für den Umgang und die gewissenhafte Darstellung der Monitoringdaten (BMWi 2018).

Einerseits soll hiermit Aufklärung über die Wichtigkeit und die Herausforderung der Datenweitergabe in der Forschung geschaffen und andererseits sollen die Bemühungen dargestellt werden, einer breiten interessierten Gruppe gerecht zu werden.

2 Akquirierung von Monitoringdaten

In der Forschung erfüllen Monitoringdaten mehrere Zwecke. Primärer Zweck ist dabei die Gewinnung neuer Erkenntnisse und die Erbringung von quantifizierbaren Nachweisen umgesetzter Maßnahmen. Die Akquirierung von Daten als Allgemeingut der Forschung wird durch die Tatsache erschwert, dass Monitorings in der Forschung oft auch an wissenschaftliche Arbeiten geknüpft sind. Zusätzlich ist die Datenschutzverordnung insbesondere für personenbeziehbare Daten eine Hürde bei der Datenweitergabe.

Die Akquirierung sollte daher im Sinne des Datenschutzgesetzes und im Interesse des Urhebers der Daten

1. eine Art Urheberrecht auf die Daten in Bezug auf den ursprünglichen oder laufenden Forschungsgegenstand erteilen.
2. die zukünftigen Nutzer der Daten dazu verpflichten, eigene Erkenntnisse aus den Daten nur mit dem Beleg einer Nutzung für andere Schwerpunkte als den ursprünglichen oder laufenden zu veröffentlichen.
3. dafür werben, dass Messdaten aus der Energieforschung im Sinne der Energiewende zum Allgemeinwohl der Forschung selbst beitragen und den Erkenntnisgewinn sowie die Umsetzungen von Maßnahmen in Deutschland beschleunigen.

3 Übertragung von Monitoringdaten

Monitorings erfolgen stets nach den Bedürfnissen des übergeordneten Projektes und verfolgen daher das Ziel, die Analyse eines definierten Sachverhalts zu erlauben. Die Größe der Datenmenge ist dabei abhängig von der Abtastrate, der Anzahl an Sensoren sowie der Dauer des Monitorings und kann unter Umständen mehrere Gigabyte annehmen. Bei solch großen Datenmengen sind Sicherheitsvorkehrungen zu treffen, um bei einem Uploadvorgang das Risiko von Datenverlusten zu minimieren. Das Konzept dafür ist in der folgenden Abbildung 1 dargestellt.

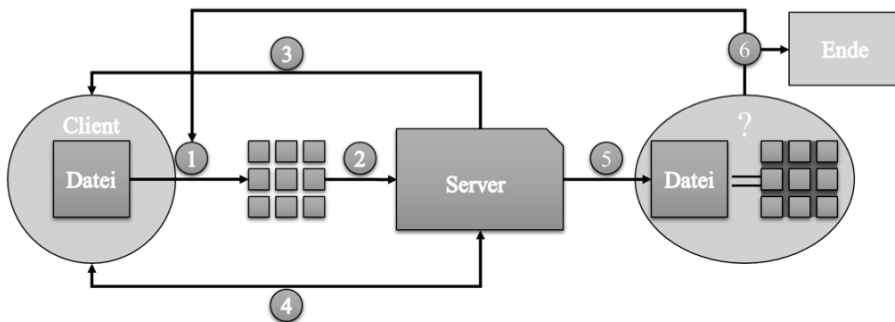


Abb. 1: Übertragungskonzept mit Kontrollschleife für große Monitoring-datenmengen

Für den Upload ist vorgesehen, dass die vom Client zu übertragende Datei in kleinere Dateien mit geringer Dateigröße von etwa 1 MB und zugeordnetem Hashwert zerlegt wird (1). Zu Beginn des Übertragungsvorganges wird eine Liste aller so erzeugter Hashwerte an den Server übermittelt (2), welcher dann überprüft, ob bereits Dateien vorhanden sind. Nach der Überprüfung wird eine Liste mit allen fehlenden Hashwerten an den Client übertragen (3). Dieser Vorgang ist notwendig, um bei vorherigen Übertragungsfehlern oder Abbrüchen des Sendevorganges die Datenübertragung fortzusetzen.

Sobald der Client die Liste der fehlenden Hashwerte der Dateien erhalten hat, werden die Dateien einzeln an den Server gesendet. In einer Kontrollschleife wird daraufhin der Hashwert der vom Server empfangenen Datei überprüft und bei einer erfolgreichen Überprüfung wird die nächste Datei vom Server angefordert (4). Sobald der Server sämtliche Komponenten der Ursprungsdatei erhalten hat, werden die Komponenten in die ursprüngliche Form auf dem Server zusammengesetzt und die Hashwerte der ursprünglichen und zusammengesetzten Datei miteinander verglichen (5). Bei einer erfolgreichen Übertragung und Übereinstimmung der Hashwerte wird die Kommunikation zwischen Server und Client beendet (6). Stimmen die Hashwerte der zwei Dateien nicht überein, so muss die Datei verworfen und erneut vom Client angefordert werden (6)→(1).

Der Vorteil dieses Konzeptes liegt in der geringen Einzeldateigröße der zerlegten Datei und in dem mehrstufigen Kontrollmechanismus. Die geringe Dateigröße ermöglicht trotz einer langsamen Internetverbindung die vollständige und schrittweise Übertragung der Daten. Ein Verbindungsabbruch führt bei diesem Konzept nicht zu einem Reset der serverseitigen

Dateien, sondern lediglich zu einer Übertragungspause. Sobald die Verbindung wiederhergestellt ist, wird die Übertragung durch die Kontrollschleifen fortgesetzt.

4 Bereitstellung von Monitoringdaten

Das angestrebte Dateiformat zur Bereitstellung der Monitoringdaten ist HDF5, ein hierarchisches Dateiformat, in dem Datenpakete wie in einem Ordnersystem strukturiert gesichert und mit Metadaten versehen werden können. Zur Speicherung aller Daten ist eine lokale Datei dieses Typs auf einem Server beim Projektträger Jülich vorgesehen. Der Vorteil dieses Dateiformates ist unter anderem die Auslesegeschwindigkeit, da beispielsweise bei einem Suchvorgang nicht die gesamte Datei in den Speicher geladen werden muss. Es können somit effizient und selektiv Daten ausgelesen werden, selbst wenn diese eine komplexe Struktur aufweisen. Zusätzlich können auf verschiedenen Plattformen einfache Werkzeuge zum Auslesen erstellt werden (HDF-GROUP 2018).

Es bietet sich für eine plattformübergreifende Bereitstellung der Datenbank für interessierte und berechtigte Nutzer an, ein bidirektionales Tool einzurichten. Der bidirektionale Datenverkehr ermöglicht dann mit Hilfe eines vom Projektträger Jülich verwalteten Kontosystems zur Berechtigungserteilung einen Upload und Download von Daten in dem für den Upload geforderten beziehungsweise für den Download gewünschten Dateiformat.

Die Zugänglichkeit der Hauptdatei auf dem Server soll durch erweiterbare Suchfunktionen und Exportmöglichkeiten erreicht werden. Da die Datenbank in Zukunft die Projektlandkarte der Begleitforschung unterstützen soll, ist keine übergeordnete Struktur vorgesehen. Durch die erweiterbare Suche kann somit flexibel in den Metadaten der einzelnen Projekte nach Förderkennzeichen, Verbundbezeichnungen, Vorhabensbezeichnungen, ausführenden Stellen, Leistungsplansystematiken, Phasen, Zeiträumen und Personen oder Institutionen gefiltert werden.

Um Fehlinterpretationen der Datensätze aus einem Monitoring vorzubeugen, wird ein großer Wert auf die Darstellung und Bereitstellung von entsprechenden Metadaten sowie Monitoringschemata gelegt. Detaillierte Angaben zu den genutzten Messgeräten sind somit seitens der Bereitsteller der Monitoringdaten unerlässlich.

5 Qualitätsmanagement

5.1 Bedeutung für die Messdatenbank

Wie einleitend beschrieben, werden Messdaten in unterschiedlichen Monitoringprojekten unterschiedlich behandelt. Das übergeordnete Ziel einer umfassenden Messdatenbank ist jedoch die Wahrung der Konsistenz der gesicherten Daten (ERHORN-KLUTTIG H., ERHORN H., REIB, J. u.a. 2018). Aus diesen theoretischen Überlegungen ergeben sich bereits folgende Herausforderungen:

1. Bezogen auf die Rohmessdaten ist eine projektübergreifende Einheitlichkeit der zeitlichen Auflösung nicht möglich.

2. Die genutzte Sensorik unterschiedlicher Monitoringprojekte führt zu Ergebnissen unterschiedlicher Qualität.
3. Unterschiedliche Ansätze zur Datenfeldbezeichnung führen ohne Nachbehandlung zu einer kritischen Inkonsistenz in der Datenbank, insbesondere für automatisierte Auswertungsmechanismen.

Kostengründe und angestrebte Untersuchungsziele führen in den Projekten stets zu mindestens einem der aufgeführten Punkte. Das Qualitätsmanagement ist daher auf eine isolierte Betrachtung der übertragenen Daten der Projekte beschränkt.

Der direkte Vergleich verschiedener Projekte sowie die Adaption der Methodik abgeschlossener Projekte durch zukünftige Projekte spielen für das Gewinnen neuer Erkenntnisse eine übergeordnete Rolle. Eine ausführliche Dokumentation des Monitorings ist daher für die Messdatenbank essenziell und bildet den wichtigsten Punkt für die Qualitätssicherung.

5.2 Qualitätssicherung der Dokumentation

In der Messdatenbank wird die Dokumentation der Monitoringdaten in Form von Metadaten der entsprechenden Datensätze realisiert. Aus den Metadaten muss entsprechend der Transparenz in Statistiken insbesondere die Herkunft der Daten und die Methodik der Datenerhebung ersichtlich werden (WEIN 2002). Ein Ziel der Entwicklung der Messdatenbank ist die Vereinheitlichung der Datenfeldbezeichnungen. Der Anlass dazu wird unter anderem durch die notwendige Konsistenz für automatisierte Auswertungswerkzeuge sowie durch den Vorteil einer effizienteren Querauswertbarkeit verschiedener Projekte gegeben (ERHORN-KLUTTIG, ERHORN, REIB u.a. 2018).

Die folgende Abbildung 2 zeigt dazu einen möglichen Vorgang zur Vereinheitlichung. Der Datenschlüssel 1 wird mit einem geeigneten Übersetzungswerkzeug in den einheitlichen Datenschlüssel 2 übersetzt. Neben dem Datenschlüssel werden ebenfalls Metadaten inklusive Einheiten der Datenwerte und die Messdaten selbst übertragen.

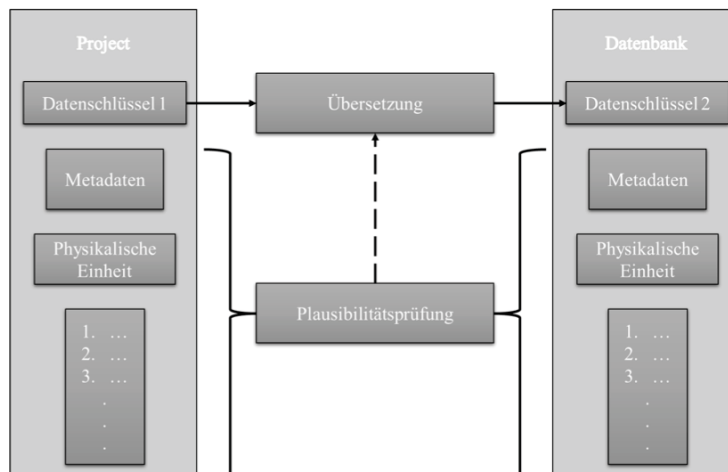


Abb. 2: Übersetzungsvorgang und Ansatzstellen für die Plausibilitätsprüfung

Die Plausibilität der Daten liegt generell im Interesse aller Beteiligten. Eine Prüfung auf Plausibilität durch die Begleitforschung kann jedoch nur sehr eingeschränkt automatisch durchgeführt werden und wird daher in erster Linie als gegeben angenommen. Das gilt insbesondere für die Metadaten, die physikalischen Einheiten sowie für die Datenwerte der Messdaten. Ein Konzept für eine möglichst einfache Systematik einer Plausibilitätsprüfung ist in der folgenden Form von jedem Projekt und teilweise auch seitens der Datenbank realisierbar:

1. Konsenstest zwischen Medium und Einheit
2. Konsenstest zwischen Einheit und Datenwerten
3. Überprüfung der Datenwerte
4. Überprüfung der Übersetzbarkeit des Datenschlüssels

Die Metadaten müssen auch für die übertragenen Informationen zwingend das Medium und die zugehörige Einheit beinhalten. Für den Konsenstest sind jedoch weiterführende Informationen notwendig, da durch verschiedene Untersuchungsgegenstände nicht immer allgemeingültige Regeln für den Konsens gegeben sind. Es liegt daher in der Verantwortung des Projektes, die Plausibilität der Daten zu gewährleisten. Das gilt insbesondere auch für die Überprüfung der Datenwerte, da diese im Endeffekt das Projekt repräsentieren. Die Stimmigkeit der aufgeführten Prüfung stellt als Ergebnis die korrekte Darstellung des Projektes auf der Messdatenbank sicher.

Unterpunkt 4 des Prüfungsvorschlages ist der Kernpunkt des Qualitätsmanagements seitens der Datenbank. Sofern die Datenschlüssel mit Hilfe der Dokumentation des jeweiligen Projektes entschlüsselt werden können, sind im Allgemeinen Mechanismen für eine Vereinheitlichung anwendbar.

5.3 Vereinheitlichung des Datenschlüssels

Jeder Datenschlüssel entspringt einem System aus Vokabeln und zugeordneten Kürzeln. Die Vereinheitlichung kann dabei nur durchgeführt werden, wenn die Bedeutungen aller Kürzel, also die entsprechenden Vokabeln vollständig bekannt und eindeutig zuzuordnen sind. Der Übersetzungsvorgang entspricht dann der Überführung eines beliebigen Vokabulars in das vereinheitlichte Vokabular. Abbildung 3 zeigt die Herausforderung eines Übersetzungsvorganges bei grundlegend verschiedenen Schlüsselsystemen.

In dem Beispiel soll der Datenschlüssel DS 1 eines Projektes in den vereinheitlichten Schlüssel DS 2 übersetzt werden. DS 1 ist aus 32 Informationsstellen zusammengesetzt, wobei 17 davon Klartextstellen sind. Es ergeben sich dadurch 6 Informationsblöcke mit festgelegter Reihenfolge. Das zugehörige Vokabular enthält für jedes Kürzel in Form eines Informationsblockes eine entsprechende Charakteristik. Der beispielhafte Einheitsschlüssel DS 2 beinhaltet eine beliebige Stellenanzahl X pro Informationsblock, wobei es 8 Informationsblöcke mit der angegebenen festgelegten Reihenfolge gibt. Die erste Einheit „Building“ entspricht einer benutzerdefinierten Angabe. Die darauffolgenden Informationseinheiten beschreiben mit steigender Detailtiefe die Lage des Sensors im Bauteil sowie die Art und Funktion der Datenwerte. Auch hier ist trotz beliebiger Stellenanzahl ein Kürzelsystem hinterlegt, um die Länge der Datenschlüssel gering zu halten.

Es besteht für beide Datenschlüsselsysteme ein individuelles Vokabular, wobei DS 1 auf

einem deutschen und DS 2 auf einem englischen Vokabular basiert. Aus diesem Beispiel wird bereits ersichtlich, dass mehrere Faktoren eine direkte Übersetzung erschweren. Neben der Sprache sind das insbesondere die Schlüssellänge bzw. die Anzahl der Informationsblöcke, die Abfolge dieser im Schlüssel sowie das genutzte Vokabular.

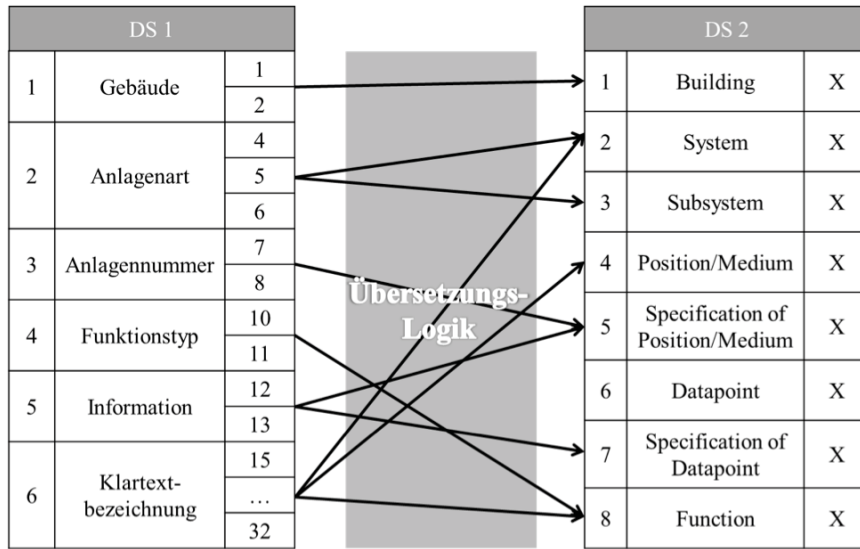


Abb. 3: Beispielhafte Logikhürde für eine automatisierte Übersetzung

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die Übersetzung bereits vorhandener Datenschlüssel aus abgeschlossenen Projekten keine endgültige Lösung darstellt. Zur Erzeugung und zum Erhalt der Konsistenz in der Datenbank sollen zukünftige Projekte einen einheitlichen Datenschlüssel nutzen, welcher sich derzeit noch in der Entwicklung befindet. Die Vereinheitlichung betrifft somit nur eine begrenzte Anzahl an Projekten.

5.4 Konzept für den einheitlichen Datenschlüssel

Die Syntax des Datenschlüssels wird aus einem bereits bestehenden Konzept des Fraunhofer ISE abgeleitet. Zur Erhöhung der Möglichkeit von individuellen Angaben ist eine Erweiterung mit mehreren Sonderzeichen vorgesehen. Einzelne Informationsblöcke werden dadurch funktional deutlich voneinander getrennt. Der Beginn des einheitlichen Systems wird durch die Zeichenfolge („/“) angekündigt, sodass vor diese Zeichenfolge eine individuelle Gebäude- oder Quartiersbezeichnung gesetzt werden kann. Einzelne Informationsblöcke werden, wie auch im ursprünglichen Konzept vorgesehen, durch den Haupttrenner („_“) voneinander getrennt (RÉHAULT, RIST & ZEHNLE 2016). Zusätze zu den Informationsblöcken werden mit einem („.“) gekennzeichnet. Um auch innerhalb eines Informationsblockes individuelle Zusätze zuzulassen, beispielsweise zur Nummerierung von Bauteilen, wird ein („-“) verwendet.

Der leere Schlüssel weist somit die allgemeine Form „//_._.“ auf. Die Informationsblöcke darin sind namentlich „Building“, „System“, „Subsystem“, „Position/Medium“, „Specification of Position/Medium“, „Datapoint“, „Specification of Datapoint“ und „Function“.

6 Datenschutz

Personenbeziehbare Daten bilden einen kritischen Punkt in der Bereitstellung der Monitoringdaten. Zum einen sollen die Monitoringdaten der Verbesserung oder der Bestätigung von Energieeffizienzmaßnahmen dienen und zum anderen lassen sich aus den Datensätzen potenziell Verhaltensweisen herausfiltern (KEIL 2015).

Mit Hilfe von CO₂-, Luftfeuchte-, und Temperatur-Sensoren ließen sich theoretisch schon personenbeziehbare Verhaltensweisen erkennen. Der Konflikt zwischen Datenschutz und Energieforschung liegt demnach in der Abtastrate und den Metadaten der Sensoren. Es werden daher Rahmenbedingungen seitens des Datenbankbetreibers benötigt, die Personen absichern und gleichzeitig der Forschung eine ausreichende und nützliche Datengrundlage bieten.

Danksagung

Die Autoren danken dem deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die finanzielle Unterstützung des Projektes „BF2016: Wissenschaftliche Begleitforschung im Forschungsbereich 'Energie in Gebäuden und Quartieren'- Schwerpunkt: Koordination, Wissenschaftliche Beratung und Datenbank“ (FKZ 03ET1388A) im Rahmen des sechsten Energieforschungsprogrammes. Wird nach dem Review eingefügt.

Literatur

- BMW (2018), Forschungsinitiative Energiewendebauen,, In: Themenseite Energieforschung, www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/forschungsinitiative-energiewendebauen.html, (11.06.2018).
- BMW (2016), Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende, Berichtsjahr 2015.
- ERHORN-KLUTTIG, H., ERHORN, H., REIB, J. u.a. (2018), Messleitfaden für Demonstrationsvorhaben im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“.
- HDF-GROUP, (2018), HDF5 Description, www.portal.hdfgroup.org/display/-HDF5/Introduction+to+HDF5, (08.06.2018).
- KEIL, M. (2015), Smart Buildings vs. Data Privacy Law. In: Seminar Innovative Internet-Technologien und Mobilkommunikation WS 2014/2015.
- RÉHAULT, N., RIST, T., ZEHNLE, S. (2016), Kennzeichnungsstruktur zur Automatisierte Prozessierung von Datenpunkten für das Technische Gebäudemonitoring. In: Fraunhofer ISE, Gruppe für Betriebsführung von Gebäuden.
- WEIN, E., (2002), Datenqualität und Datenprüfungen. In: Statistisches Bundesamt, Wirtschaft und Statistik 2/2002.

Implementation of a Validation Framework for the Information Container for Data Drop

Philipp Hagedorn

Leibniz Universität Hannover ·
Welfengarten 1 · 30167 Hannover · Germany
E-Mail: hagedorn@stud.uni-hannover.de

The emergence of Building Information Modeling (BIM) during the last years leads to an enormous range of capabilities for Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry utilizing building models for the complete building lifecycle. With the increasing demand for exact delivery dates, detailed cost estimation, and sustainable quality management, planners attach additional levels and sources of information to the BIM data. This heterogeneous information can be linked to geometric building models to support the planning process and the asset management over the building lifecycle. However, these connections are mainly established using software tools that use proprietary data formats, leading to a lack of interoperability in information exchange. To regain interoperability, an international standard has been drafted under the ISO 21597 “Information Container for Data Drop”. Within this paper, a literature review on the exchange of linked building models and state-of-the-art Linked Open Data approaches is the basis for the analysis of the ISO standard. Furthermore, the analysis facilitates the implementation of information container into a web-based software application. The paper introduces concepts and implementations for the import and validation of the standardized file format, the visualization of the contained documents and the manipulation of links inside the container by a user in order to write the changes back into the standardized data format.

Keywords: BIM, data exchange, linked data, information container, validation framework

1 Introduction

In the AEC industry, many parties work together to provide the client with appropriate quality within the assured cost and time frame. The BIM method supports this by parametric modeling of the physical building structure and attribution with all planning-relevant information. To establish collaboration between project partners, models and information are exchanged with each other at regular intervals (data drops). Therefore, three-dimensional geometric models are commonly linked with different information models, e.g. scheduling, costs or maintenance (BORRMANN et al., 2015). The integration of separate part models using the Industry Foundation Classes (IFC) data format into a coordination model is supported by most authoring tools and collaboration platforms. In addition to the part model and its inherent information, further data can be linked to the model such as documents, plans, schedules or bill of quantities. The data structures of the schedule and bill of quantities are separate information models which facilitate the 4D construction sequencing simulation or the 5D cost estimation. In the case of a 4D model (geometry + schedule), every geometric object is linked to a single process using the IFC GUID and an ID of the corresponding process from

the schedule (BORRMANN et al., 2015). This connection can be established with several software tools. Nevertheless, the exchange of the linked model is done with proprietary data formats. Since the proprietary data formats are rarely interoperable, they interfere the open BIM approaches that are mostly gained through the IFC data format (DU JUAN & ZHENG, 2014). As stated by TÖRMÄ et al. (2012), the combination of the different information models in a centralized model leads to a lack of interoperability.

For further interoperability especially regarding the link of model entities and definition of additional metadata, an international standard has recently been drafted under the ISO 21597-1 “Information Container for Data Drop”. The usage of a container structure for data drops during the planning process can offer significant advantages for data exchange, since all relevant models can be transferred in one file with retained links. The paper deals with the application of state-of-the-art Linked Open Data within the AEC domain for the exchange of linked building models. In this respect, it introduces the Information Container for Data Drop (ICDD). The main part of the paper focuses on concepts and implementations for the import and validation of the standardized file format. Finally, the results of the work with the container are discussed and made available for further use in the practical application of the standard.

2 Related Work

2.1 Linked Open Data (LOD)

The original information management concept of Linked Open Data (LOD) was introduced by BERNERS-LEE (2006) as a part of the Semantic Web development. The concept provides open resources along the Internet which can be identified using Uniform Resource Identifiers (URI). These resources can be accessed via the HTTP protocol and with this offer the possibility to reference further data resources. Generally, LOD delivers major benefits for information exchange especially in interoperability and connection of heterogeneous data (CURRY et al., 2013).

In order to formulate the structure of a system with its entities and relations, for instance, a closed amount of resources, the definition of a computational ontology is helpful STAAB & STUDER (2009). In case of a building system, a set of relations between built objects or spatial descriptions can be structured through an ontology (BORRMANN et al., 2015). For this reason, it contains a consistent definition of classes, properties, and instances. Moreover, these structures are related in a subject-predicate-object pattern defined by the Resource Description Framework (CYGANIAK et al., 2014). The key point in defining an ontology is the taxonomy which can be expressed with a specialized hierarchy of classes. In accordance with the object-oriented programming paradigm, ontology classes can be subclasses of each other and be instantiated to get individuals of a specific class STAAB & STUDER (2009).

The RDF datatype can be expressed using the XML format and is extended with additional vocabularies from the Web Ontology Language (MOTIK et al., 2012). The Web Ontology Language (OWL) is a descriptive language to publish and exchange ontologies within the RDF syntax. OWL extends RDF mainly with vocabularies for class or property definitions.

2.2 Approaches for AEC

In the past few years, many approaches utilizing LOD for the construction industry have been contributed. Indeed, LOD offers a concept to improve the management of information and interrelationships between resources. This apparently leads to the application in the AEC domain and especially in the BIM workflow.

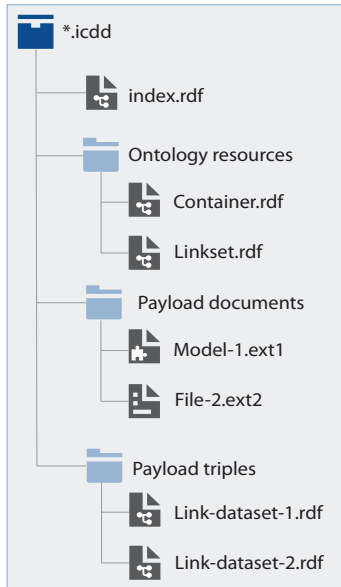
The relationship between BIM and LOD was examined by ABANDA et al. (2013) looking at IFC and other common formats in AEC. The authors discussed commonalities and symbioses between the two areas, but also focus on differences and deficiencies. As a result, the weakness of IFC due to constraints in the file format's expressivity has been identified. Consequently, they considered the application of the IFC-to-RDF toolbox introduced by PAUWELS & VAN DEURSEN (2012). With this toolbox, any IFC file can be parsed into the ifcOWL ontology. It instantiates ontologies directly from IFC EXPRESS schema so that the generated RDF-Graph can be used to query information from the model or to link individual elements with product or material resources (ABANDA et al., 2013). With these insights, PAUWELS & VAN DEURSEN (2012) called LOD "a valid approach for addressing existing interoperability issues in the AEC domain". Because of the direct translation from IFC to RDF, the ontology inherits a complexity that makes it less extendable (RASMUSSEN et al., 2017). Meanwhile, PAUWELS & TERKAJ (2016) critically questioned the development of ifcOWL and claimed that it will not develop into a standard according to the current state of the ontology. Thus, the research group around RASMUSSEN et al. (2017) introduced the Building Topology Ontology (BOT) after an investigation of generic and domain-specific ontologies. The BOT focuses on simplicity and usability in order to replace ontologies that are not consistent and contain redundant data sets.

2.3 Container

The exchange of linked building models in model containers was focused by the Mefisto project in Germany funded by the Federal Ministry of Education and Research. The outcome of the research project was the application of multi-models to link building models with other information models (SCHERER & SCHAPKE, 2011). The definition of multi-model is associated with the implementation of a Multi-Model-Container (MMC). Inside of the container, the part models are independent instances in their own format which can be connected using a link model. This link model provides the information about the dependencies between single elements from different part models (FUCHS et al., 2011). A practical orientated case of application of the multi-model approach is the BIM-LV-Container. The BIM-LV-Container has been standardized in the DIN SPEC 91350 for the exchange of building models in the IFC format with an attached bill of quantities. Furthermore, it has been developed to be a central part of the tender phase and allows data exchange especially between planner, client, contractors, and manufacturers.

Besides these approaches in Germany, there were efforts in Netherlands to develop an interdisciplinary container for the exchange of information called the COINS project (HOEBER et al., 2015). The project targeted the standardization of a flexible information container for connecting the complete amount of building data using linked data approaches. An initial version of the container was published by 2010, an update was provided by 2014. These versions are the predecessors of the ISO 21591 "Information Container for Data Drop".

2.4 ISO 21591 “Information Container for Data Drop”



Information Containers specified by the ISO 21591 have the file type extension icdd and are archived according to the application/zip mime-type. The definition of the container structure can be found in Part 1 of the standard. Each container is specified by a header file which is serialized as an RDF/XML file. It contains imports for the Container.rdf and Linkset.rdf which provide the respective ontologies to the header file. Both ontology files can be found in the Ontology Resources folder or must be linked as an external resource.

The Container.rdf delivers an ontology for the container description and offers classes to instantiate several container meta-datasets, a set of either internal or external documents and link datasets. All internal documents are stored within the Payload Documents folder, whereas all link datasets belong to the Payload Triples folder (see Figure 1). Additional metadata can be defined for both ontologies and must meet requirements defined in the standard.

The Linkset.rdf supplies the container with an ontology specifying classes for Links and LinkElements. In this standard, the class Links is specialized by different subclasses such as directed or binary link classes. The

standard allows the user to declare additional subclasses of the type Link. A link element is related to exactly one document from the document list in the header file. Moreover, a link element may link to an entity of a document or model using the optional hasIdentifier property of the class. These identifiers can either be query-based, string-based or URI-based. For instance, a string-based identifier could contain the GUID of a specific element inside an IFC model or an URI-based identifier could link to an external resource.

The second part of the standard is mainly concerning the DynamicSemantics.rdf and the associated extensions of the container using Linked Open Data. According to the standard, there are six additional features delivered through the DynamicSemantics ontology: an extended metadata concept, class descriptions for entities of information models, property definitions, the specification of relationships, an expiring concept and the extension with User Defined Ontologies (UDO). UDOs extend the DynamicSemantics ontology with its inherent classes and especially the Entity class, for example, an additional ontology for units.

2.5 Findings

To summarize it, building ontologies are not yet able to replace IFC or other interfaces but can extend it to a certain degree. The literature proves that ontologies can provide machine-readable links between information models. Nevertheless, the IFC file type is a central element during the BIM planning process nowadays. Hence, it has limitations in the expandability and has not been designed to transfer additional information models. Both approaches, the information container and Linked Open Data, form a powerful basis for the implementation of the Information Container for Data Drop.

3 Validation Framework

The developed Validation Framework is based on the conformance criteria provided by either part of the standard. The implementation of the framework relies on the data structure of the developed classes `IcddValidator` and `IcddValidationResult`. The validation results class consists of the label of the criterion, the respective expected value, and an examined value. The validation of a container using the `validate()` method returns a collection of validation results which can each be validated by comparing the expected and the examined value. The `is-valid()` method returns whether all results are valid. Only then, a container of the `IcddContainer` class is returned by the `getValidContainer()` method.

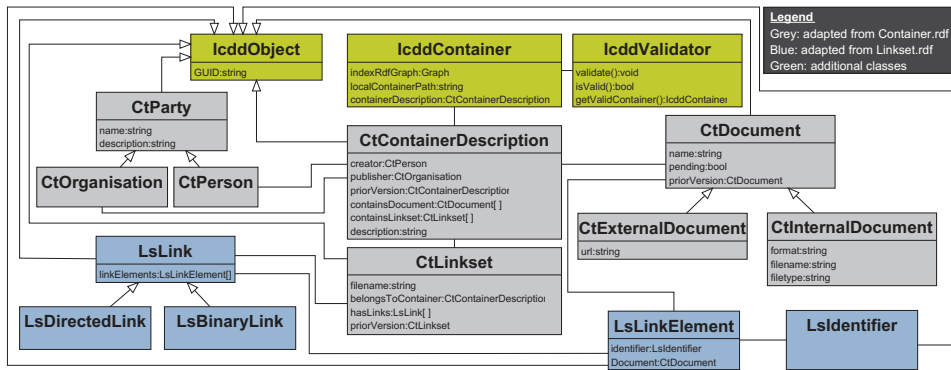


Fig. 2: Excerpt from the Class Diagram for the ContainerModel namespace

The data model for the container consists of the `IcddContainer` and the `CtContainerDescription` classes (see Figure 2). These form the interfaces to the file-based container on the one hand and the ontology-based container on the other hand. Firstly, the `IcddContainer` opens the archive of the container and stores folders and files locally. During the implementation, it has evolved that storage and access to the archive inside the memory lead to decreasing performance even with smaller container files.

In a second step, the `CtContainerDescription` instance is created. Therefore, the `IcddContainer` provides an RDF graph parsed from the `index.rdf` file. All RDF files in this framework are parsed with the `dotNetRDF` framework that transfers RDF files into a collection of triples using the subject-predicate-object pattern. The data model for metadata from the header file is implemented analogous to the class descriptions delivered by the `Container.rdf` and denoted with the prefix `CT`. Inside of the RDF, instances are identified by the `rdfs:about` tag. This tag needs to be transferred into the data model due to write changes back into the RDF file. For this reason, an abstract class `IcddObject` is implemented which maps the `about` tag into an ID field. Every class that can be instantiated from RDF has to be derived from this class (see Figure 2).

Generally, the introduced `ContainerModel` class library can be used in various projects as a reference, so that users can access the data model. Furthermore, a toolkit with the Validation Framework will be published as a web-based service. To allow third-party software to validate the conformity of an information container, the service can be accessed via a Web API.

To validate and manipulate ICDD files, both parts of the standard must be considered. For further development, the second part will be focused. Therefore, the data model will be supplemented with the classes from the DynamicSemantic ontology. At runtime, the standard header files and all connected ontology files inside of the container are checked according to user-defined classes and instances. For this, the RDF files can be parsed into an OntologyGraph by the dotNetRDF framework. The resulting graph delivers all classes that are defined within the file. Furthermore, the concept provides a method that checks whether a class can be added to the existing data model. According to VÖLKE (2005), these classes will be written from the RDF schema at runtime using the C# CodeDom Compiler, can be derived from existing classes and are then accessible in the data model.

4 Case Study

First case studies with ICDD sample data from the standard appendix show the usability of the framework. Three different models were used to evaluate the framework, each with different characteristics of the container and the ontologies it includes.

Step 2: Validation

Validation for:

usecase_1b_delivery.icdd

Conformance Overview:

Congratulations. Your file has been validated successfully.

Documents: 5
Linksets: 1
User Defined Ontologies: 0

Conformance Validation

- Refers directly or indirectly to the Container.rdf ontology? --> True
- Are all files within the 'Payload documents' folder listed in the header file? --> True
- Are all Link datasets within the 'Payload triples' folder listed in the header file? --> True
- Contains the value 'part1' for the ct:conformanceIndicator property? --> True

Part1Documents

- Is each document listed in the container stored in the 'Payload documents' folder? --> True

Part1Linkset

- links.rdf: Complies with RDF/OWL specification? --> True
- links.rdf: Is Rdf/XML-Abbreviated serialised? --> True
- links.rdf: Is stored in 'Payload triples' folder? --> True

Link Logic Validation

Select Linkset: links.rdf

Select Validation Rule: Consistent Link Types

Validate

Results

Linkset	ValidationRule	Link Consistency Validation
links.rdf	Consistent Link Types	True
links.rdf	Is Conform	True
links.rdf	Unconform Types	0

Fig. 3: Screenshot from the web-based Validation Framework

Firstly, the validation of the conformance requirements of the standard is conducted after the file is uploaded. The file-based validation and the metadata checks work without major errors and show conformity results according to the standard (see Figure 3). An issue with the case sensitivity in the folder structure of the container has been improved afterwards. The figure shows the list of evaluated criteria of ICDD Part 1 and 2 conformance requirements. In addition, the web application provides a logic validator for linksets which can be seen in figure 3 as well. During the case study, it has evolved that failed validations should suggest repair processes according to the conformance requirements.

In a subsequent step, the validated container data model proceeds to an explorer. The information contained in the data model introduced in section 3 can be selected from a tree view. Selected items can be displayed and edited in an explorer. Besides the metadata that is parsed from the respective files, the physical files can be viewed within the browser. To summarize

it, the use cases confirm the expected functionality. Nonetheless, there are a lot of functionalities that need to be implemented for the practical application of the toolkit.

5 Conclusion and Outlook

The paper introduces a validation framework for the ISO 21591 “Information Container for Data Drop” with web-based access and a dynamic data model. The standard is based on current technology and the proven concept of an information container. The container can be applied in many use cases and fulfills the purpose of data transfer in a single data drop. The structure of the container is well organized in folders and can provide documents and link sets in a large number. The container is highly extendable and flexible due to User Defined Ontologies and other dynamic metadata. Although, this flexibility leads to a higher complexity regarding the implementation of import and export functionalities. This applies in particular to the dynamic semantics and the parsing from RDF into a programmatic data model.

The framework presented in this paper offers a validator for files according to the standard mentioned above. It is suitable for users that need to validate their files or developers that have to implement import and export methods of information containers into their individual software solution. Furthermore, the paper shows which technologies and structures can be used to develop a framework. It is important to say that this work is based on the draft of the standard. The final version may vary and can result in changes for this framework.

To enhance the functionality, further development of this project focuses on improvements and extensions according to the data model. A major feature is the modification of data and the export functionality into RDF instances and a valid container file. Therefore, methods and constructors must be extended to create new objects that are conform to the standard and can be parsed into the RDF format. To achieve a high reusability of the framework, the Web API will be refined and documented to foster the easy access of container files. Future work will assess the practicality of the standard and the application cases within the AEC industry.

Acknowledgments

This paper was written during the development of my master’s thesis which was supervised by the Institute of Risk and Reliability at Leibniz Universität Hannover and the Chair for Computing in Engineering at Ruhr-Universität Bochum. I give special thanks to Prof. Berkhahn and Prof. König for their helpful advice during the writing process.

Literature

- ABANDA, F. H., ZHOU, W., TAH, J. H. M. & CHEUNG, F. (2013): Exploring the Relationships between Linked Open Data and Building Information Modelling. In: *Proceedings of the Sustainable Building Conference 2013*, 176-185.
- BERNERS-LEE, T. (2006): Linked Data - Design Issues. <https://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html> (9.4.2018).
- BORRMANN, A., M. KÖNIG, C. KOCH and J. BEETZ (Eds.) (2015): *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. VDI-Buch. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- CURRY, E., O'DONNELL, J., CORRY, E., HASAN, S., KEANE, M. & O'RIAIN, S. (2013): Linking building data in the cloud. Integrating cross-domain building data using linked data. In: *Advanced Engineering Informatics* 27 (2), 206-219.
- CYGANIAK, R., WOOD, D. & LANTHALER, M. (2014): RDF 1.1 Concepts and Abstract Syntax. <https://www.w3.org/TR/2014/REC-rdf11-concepts-20140225/> (10.4.2018).
- DU JUAN & ZHENG, Q. (2014): Cloud and Open BIM-Based Building Information Interoperability Research. In: *Journal of Service Science and Management* 07 (02), 47-56.
- FUCHS, S., KADOLSKY, M. & SCHERER, R. J. (2011): Formal Description of a Generic Multi-Model. In: Reddy, S. (Ed.): *20th IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*. IEEE, Piscataway, NJ.
- HOEBER, J. G., ALSEM, D. M. & WILLEMS, P. H. (2015): The management of information over the life-cycle of a construction project using open-standard BIM. In: *Proceedings of the 32nd CIB W78 Conference 2015, 27th-29th 2015, Eindhoven, The Netherlands*.
- ISO 21597-1 (2018): *Information Container for Data Drop - Exchange specification - Part 1: Container (ISO 21597-1)*.
- MOTIK, B., PATEL-SCHNEIDER, P. & PARSIA, B. (2012): *OWL 2 Web Ontology Language Structural Specification and Functional-Style Syntax (Second Edition)*. <https://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-syntax-20121211/> (11.4.2018).
- PAUWELS, P. & TERKAJ, W. (2016): EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology. In: *Automation in Construction* 63.
- PAUWELS, P. & VAN DEURSEN, D. (2012): IFC-to-RDF: Adaptation, Aggregation and Enrichment. In: *Workshop on Linked Data in Architecture and Construction (LDAC)*, 4-6.
- RASMUSSEN, M. H., PAUWELS, P., HVIID, C. A. & KARLSHØJ, J. (2017): Proposing a Central AEC Ontology That Allows for Domain Specific Extensions. In: *Lean and Computing in Construction Congress - Joint Conference on Computing in Construction*, 237-244.
- SCHERER, R. J. & SCHAPKE, S.-E. (2011): A distributed multi-model-based Management Information System for simulation and decision-making on construction projects. In: *Advanced Engineering Informatics* 25 (4), 582-599.
- STAAB, S. and R. STUDER (Eds.) (2009): *Handbook on Ontologies*. International Handbooks on Information Systems. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- TÖRMÄ, S., JYRKI, O. & HOANG, N. V. (2012): Distributed Transactional Building Information Management. In: *First International Workshop on Linked Data in Architecture and Construction (LDAC)*, 12-21.
- VÖLKEL, M. (2005): RDFReactor – From Ontologies to Programmatic Data Access. In: *Poster and Demo at International Semantic Web Conference (ISWC) 2005, Galway, Ireland*.

„Die schönsten Bahnstrecken Deutschlands“ zu IFC-Alignment

Felix Eickeler

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation · Technische Universität München ·
Arcisstraße 21 · 808333 München
E-Mail: felix.eickeler@tum.de

Infrastrukturbauwerke gehören zu den ältesten und wichtigsten Bauwerken. Die meisten Strecken wurde vor der Digitalisierung und „BIM“ geplant und gebaut. Sind Pläne vorhanden müssen sie oft in einem langwierigen und fehleranfälligen Prozess digitalisiert werden. Dieser Konferenzbeitrag untersucht isoliert die Frage welche Daten und Qualität einzig mit photogrammetrischen Methoden erhoben werden können. Das vorgestellte Verfahren nutzt Bilder aus der Perspektive einer Führerstandsfahrt und ermittelt daraus ein 3D-Modell der Strecke. Der komplette Prozess wird exemplarisch am Beispiel der Bodenseegürtelbahn „Seehäse“ durchgeführt und evaluiert. Anschließend werden Probleme aufgezeigt und Verbesserungen vorgestellt. Entgegen dem Bestreben, Bahnstrecken mit mobilen Laserscannern zu vermessen, wird ausschließlich auf bestehende Bilddaten zurückgegriffen – im Gedenken an „Die schönsten Bahnstrecken Deutschlands“.

Keywords: As-built, IFC Alignment, Structure from Motion, Pointcloud

1 Motivation

Ein Großteil der Investitionen in das deutsche Schienennetz entfällt auf den Bestandserhalt. Viele der Bauprojekte beinhalten alte und unzureichend dokumentierte Streckenabschnitte. Zusätzlich müssen diese Streckenabschnitte zunächst identifiziert und anschließend nötige Instandsetzungsmaßnahmen ausgewählt werden. Dies bedeutet nicht nur zusätzlichen Aufwand, sondern auch weitere Investitionen. Im Haushaltsplan sind für die Feststellung des Netzzustandes im Jahr 2017, 3,7 Millionen € vermerkt. Die Gesamtausgaben für die Bestandserhaltung der Schieneninfrastruktur beträgt ca. 3 Milliarden € (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR 2017). Im Gegensatz dazu sind für den Neubau von Bahnstrecken nur ca. 40% der Bundesaussgaben für Schieneninfrastruktur veranschlagt. Für eine gute Planung der Instandhaltung ist eine ausreichende Bestandsdokumentation vorgeschrieben und liegt bestenfalls in einer für das Planungsbüro nutzbaren Form vor. Wenn Bestandspläne (i.d.R. papiergebunden) existieren, sind meistens keine der bereits ausgeführten Maßnahmen vermerkt und müssen retrospektiv aufwändig bestimmt werden. Planungsbüros müssen die analogen Informationen zum Bestand zunächst aufbereiten, ergänzen und digitalisieren – ein sehr anspruchsvoller und fehleranfälliger Prozess.

Aus diesen Gründen ist die „as-is“ Zustandserfassung zu einem zentralen Punkt in der Automatisierung und der Qualitätssicherung geworden. Eine Möglichkeit ist die Vermessung des Streckenabschnittes mit einem Mobile Laser Scannern (MLS). Durch die konstante Winkelauflösung des Scanners besteht die gemessene Punktwolke aus gleichmäßig verteilten Punkten, welche sich spiralförmig um die Drehachse des Scanners anordnen (AIVARS, ROODE & TARVO 2013). Nach der Aufnahme muss die Punktwolke korrigiert werden. Ziel ist es, dass sich die Messfehler nicht im Laufe der Streckenabtastung zu einer

starken Abweichung agglomerieren.(TOTH, RAJTUKOVA & ZIVCAK 2013). Hierzu werden sogenannte Passpunkten am Streckenrand geodätisch vermessen und der Scan daran orientiert (DU, TENG 2007). Der eigentliche Streckenverlauf muss in einem zweiten, nachgeschalteten Schritt in der Punktwolke erkannt und extrahiert werden. Für die Erstellung einer solchen MLS-Punktwolke muss ein Schienenfahrzeug mit spezieller Sensorik ausgerüstet und die eine Vermessungsfahrt entlang der Gleise durchgeführt werden (konstante Geschwindigkeit bei: $\sim 22 \text{ m/s}$). Obwohl lasergescannten Punktwolken die geringsten absoluten Abweichungen haben und damit eine sehr hohe Qualität aufweisen, ist der Erstellungsaufwand relativ hoch. Falls für die Visualisierung oder die Segmentierung von Streckenelementen nötig, müssen in einem nachgeschalteten Schritt, Farbinformationen über ergänzende Bilder hinzugefügt werden.

Kameras und die photogrammetrische Rekonstruktion von Punktwolken durch die Kombination von *Structure from Motion* (SfM) und *Multiview-Stereo*-Rekonstruktionen (MVS) sind eine kostengünstige und weit verbreitete Alternative (DIMITROV, GOLPARVAR-FARD 2014; ÖZYEŞİL, VORONINSKI & SINGER 2017). Für Bahnstrecken gilt dieses Verfahren aber auf Grund seiner Anfälligkeit gegenüber *warping*, der messbaren Verzerrung und Verwindung, als nicht praktikabel. Der höhere Aufwand bei der Korrektur steht ein deutlich einfacher Aufnahmeprozess gegenüber. Wird die Sensorfläche gleichzeitig belichtet (*global shutter*) ist das Verfahren sehr robust gegenüber den Geschwindigkeitsschwankungen des Aufnahmefahrzeuges (SAURER, POLLEFEYS & HEE LEE 2016). Farbinformationen werden mit ausgewertet und Erschütterungen der Sensorik über die Kamerapositionen im Prozess herausgerechnet. Damit sind die Mindestanforderungen an das Aufnahmefahrzeug verschwindend gering – eine Kamera ist ausreichend.

Die Prämisse, dass eine Kamera ausreichend ist führt zu der Frage, ob nicht aus bestehenden Bildern eine Raumkurve abgeleitet werden kann. Dieser Konferenzbeitrag beschäftigt sich mit genau dieser Frage. In der Geschichte der DACH-Film Produktionen gibt es eine Reihe von Führerstandsaufnahmen, welche als Datenbasis dienen. Besonders bekannt ist die, für das Nachtprogramm der ARD Produzierte Filmreihe, „Die schönsten Bahnstrecken Deutschlands“ welche dem Beitrag zu seinem Namen verholfen hat (Moritz Herrmann 2015).

2 Stand der Technik

2.1 Structure from Motion

Structure from Motion ist der erste Schritt bei der Erstellung eines 3D-Modells aus aufgenommenen Bildern. Es ist nicht nötig kalibrierte Kamerasysteme zu nutzen, da die die extrinsischen und intrinsischen Parameter für jedes Bild einzeln berechnet werden können. In einzelnen Frames wird nach herausragenden Bereichen, sogenannte „Features“, gesucht (BOSCHÉ, HAAS & MURRAY 2008; SCHONBERGER, FRAHM 2016 - 2016). Features basieren im Allgemeinen auf den Bildgradienten und werden zwischen den einzelnen Bildern verglichen und gepaart. Aus allen Feature-Paaren wird der Verlauf eines Features über eine Bildserie bestimmt („Track“) (SCHMID, SOATTO & TOMASI 2006). Aus dieser Serie können die Kamerapositionen bestimmt und ggf. Verzerrungen des Objektivs korrigiert werden. Das initiale Bildpaar der Rekonstruktion gibt den Koordinatenursprung vor. Um die Genauigkeit der berechneten Positionen zu erhöhen, wird der Fehler von den berechneten Positionen über mehrere Aufnahmen (im Fall unseres Datensatzes 50 Bilder) minimiert. Diese

Verfahrenserweiterung ist als *Bundle Adjustment* bekannt und in allen aktuellen Softwareprodukten verfügbar. Der Vorteil bei der Rekonstruktion einer Bahnstrecke aus einer Bildserie ist, dass die Bilder entlang der Strecke aufgenommen werden. Es ist also nur nötig, Bilder auf einer Strecke von ca. 200 m miteinander zu vergleichen, da die Anzahl an Features darüber hinaus stark abnimmt. Kreuzkorrelationen zwischen den Bildern sind nicht existent was den Prozess stark beschleunigt.

2.2 Multi-View Stereo

Multi-View Stereo rekonstruiert aus bekannten Kamerapositionen und Bildern ein zusammenhängendes 3D-Modell. Hierzu ist eine Vielzahl von Verfahren verfügbar. Das in den meisten Softwareprodukten verwendete Verfahren, wertet für jeden Punkt im Bildraum aus wo das Pixel im Modellraum verortet werden muss. Das Resultat ist eine *dichte* Punktwolke. Die geometrische Information basieren hierbei auf den SFM-Ergebnissen und die Rekonstruktion dient hauptsächlich der Anreicherung des Modells mit Oberflächen und Flächeninformationen.

2.3 IFC-Alignment

Das IFC-Alignment 1.1 beschreibt Infrastrukturbauwerke und wurde von buildingSmart in Zusammenarbeit mit dem OpenGIS Konsortium (OGC) entwickelt. Es teilt sich dabei in ein vertikales und horizontales Alignment (BORRMANN, HOCHMUTH & SINGER 2017). Ein Alignment kann in Teilelemente unterteilt werden und besteht aus einem horizontalen, einem vertikalen und einem 3D-Alignment. Für eine ausreichende Beschreibung muss entweder ein horizontales oder eine 3D-Ausrichtung vorhanden sein. Die beschriebene Trassierung ist lückenfrei und muss tangential kontinuierlich ausgeführt sein (AMANN, BORRMANN 2015).

2.4 Erkennung von Objekten im Bildraum

Im Bereich Bildanalyse und Objekterkennung sind durch die Entwicklung von Convolutional Neural Networks (CNN) große Fortschritte erzielt worden. Im Jahr 2012 wurde mit AlexNet (KRIZHEVSKY, SUTSKEVER & HINTON 2017) ein Fehler von nur 15,3 % im Wettbewerb ImageNet (Russakovsky et al. 2015) erzielt. Ein weiteres, performantes System ist „*You only Look Once*“ (YOLO) (REDMON, DIVVALA & FARHADI 2016). Dieses spezielle Netz wertet mehrere Objektbereiche und Klassenwahrscheinlichkeiten auf einmal aus. Dabei teilt YOLO das Bild in mehrere Teilbereiche, in denen die Analyse durchgeführt wird. Trotz des geringen Fehlers von 13,6 % (2016), ist es nicht möglich sich überschneidende Randbereiche einer Objektklassifizierung mit YOLO zu erkennen.

3 Rekonstruktion am Beispiel Singen-Friedrichshafen

3.1 Datengrundlage

Als Eingangsdaten für unser praktisches Beispiel wird eine Führerstandsfahrt aus Youtube von Singen nach Friedrichshafen (siehe Abbildung 1) ausgewertet (Rotausleuchtung 2018). Die originale ARD Produktion von „Deutschlands schönsten Bahnstrecken“ ist nur in PAL (Auflösung 544 px × 576 px) verfügbar und ist damit nicht photogrammetrisch auswertbar. Das verwendete Video wurde mit einer GoPro aus dem Cockpit der Bodenseegürtelbahn, einer Lok der DB-Baureihe 232 aufgezeichnet. Die Auflösung beträgt 3840 px x 2160 px, die Bildwiederholungsrate 30 Bilder pro Sekunde (*fps*). Als SfM-

Pipeline wurde die von der ETH Zürich entwickelte Software *COLMAP* in der Version 3.4 verwendet (SCHÖNBERGER, ZHENG & POLLEFEYS 2016). Neben der Rekonstruktion der Gesamtstrecke mit 5 *fps*, wurden 2 Szenarien der Rangierbewegung (ca. 1,5 *min*) mit verschiedener zeitlicher Auflösung gemacht und aus den Kamerapositionen zusätzlich eine dichte Punktwolke (Multi-View-Stereo) zur optischen Kontrolle rekonstruiert.



Abb. 1: Strecke der Bodenseegürtelbahn. Fahrtdauer der BR 232 ca. 1h 10 min.

3.2 Performance bei der Rekonstruktion

Die Rekonstruktion mittels SfM ist sehr rechenintensiv und eine geeignete Auswahl und Reduktion der Eingangsbilder hat einen großen Einfluss. Dabei sollen die Geschwindigkeitsprofile einer Zugfahrt abgebildet werden. Zwei Extreme sind: die Rangierbewegung (eine langsame aber nicht konstante Bewegung) und die Fahrt entlang einer Hauptstrecken- grade (eine schnelle aber über weite Teile gleichbleibenden Fahrt). Bei der Auslegung wurde von einer Spitzengeschwindigkeit von 90 *km/h* ausgegangen, was bei einer Auflösung von 5 *m* pro Bild zu einer minimal nötigen zeitlichen Auflösung von 5 *fps* führt. Daraus abgeleitet muss für die gesamte Strecke die Rekonstruktion auf der beachtlichen Datenbasis von 22605 Bildern durchgeführt werden. Die Bilder wurden untereinander über einen Bereich von 250 *m* miteinander verglichen, wobei sich gezeigt hat das bei ca. 120 *m* die Anzahl an Passpunkten stark abnimmt.

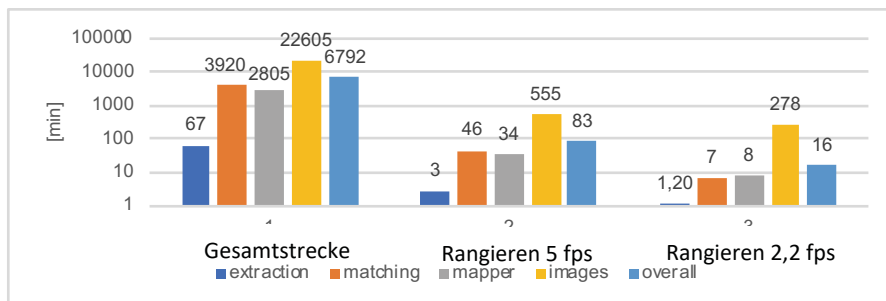


Abb. 2: Rechenzeit im Verhältnis zur Auflösung

Zur Analyse des Einflusses der Bildwiederholrate auf Geschwindigkeit und Qualität wurde die Rangierbewegung mit zwei verschiedenen Bildsätzen rekonstruiert (5 *fps* und 2,2 *fps*). Die Geschwindigkeit der Rekonstruktion nimmt deutlich ab, wenn die Anzahl der in Betracht gezogenen Bilder steigt. In Abbildung 2 ist die Dauer der einzelnen Schritte auf einer logarithmischen Skala zu sehen. Der Aufwand des zweiten SfM-Schrittes, dem Feature-Matching, steigt bei einer höheren räumlichen Auflösung (mehr Bildern) deutlich an. Im direkten Vergleich der Rangierszenarien konnte im Gleisverlauf kein optischer Qualitätsunterschied bei den Kamerapositionen festgestellt werden. Die Anzahl der Punkte der kompletten MVS-Rekonstruktion nimmt bei geringerer zeitlicher Auflösung um Faktor 1.8 ab und die Auflösung der Oberleitungen ist weniger gestört (Himmelartefakte). Die Artefakte können, ohne großen Aufwand, über ihren Farbwert entfernt werden (siehe Abbildung 4).

3.3 Schienenverlauf

Die rekonstruierten Kameraperspektiven sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Kamera, ist als fest installiertes System der Bewegung des Schienenfahrzeuges unterworfen. Das Schienenfahrzeug ist schwimmend auf den Schienend gelagert, was zu einer gewissen Abweichung zwischen Fahrzeugverlauf und eigentlichem Schienenverlauf führen kann. Dies ist besonders am Sinuslauf des Zuges beim Verlassen von Kurven zu erkennen. Durch unsere recht geringe Auflösung ist eine Filterung dieses Rauschens alleine auf Basis der Kamerapositionen nicht vollständig möglich. Aus den Kamerapositionen ist nicht nur der Verlauf, sondern auch die Neigung der Strecke abzuleiten. Dies ist besonders für das „*vertical alignment*“ der Strecke, das sich nach der „untersten“ Schiene richtet, wichtig. Durch das stehende Koordinatensystem können Pendelbewegungen des Schienenfahrzeugs aus der Rotation um die vertikale Achse isoliert und betrachtet werden.

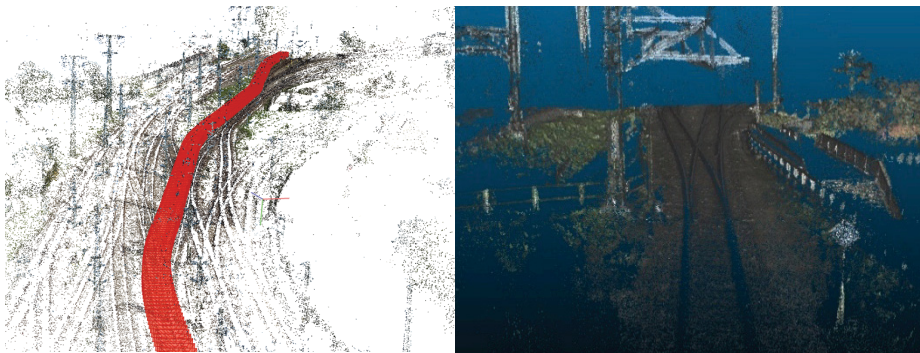


Abb. 3 und 4: (links) SfM Rekonstruktion mit eingezeichneten Kamerapositionen. (rechts) MVS Rekonstruktion der Rangierbewegung, mittlere Qualität (MATHEISEN, REINHARDT & REICHERT 2018).

Bei der Betrachtung der MVS-Rekonstruktion der Rangierbewegung fällt vor allem die gute Qualität im Bereich des Schienengrundes auf. Weichen können soweit aufgelöst werden, dass es möglich ist ihre Stellung in der Punktwolke zu erkennen. Ab ca. 5 m Entfernung von der Kameraposition nimmt die Qualität der Punktwolke deutlich ab. Der Autor vermutet, dass die schnelleren relativ Bewegung der Objekte am Rand zu einer höheren Unschärfe der Bilder führt. Exemplarisch für schnelle, um die Bildachse geführte Bewegung, sind Erschütterungen. Erschütterungen sind bei Fahrten mit niedrigen Geschwindig-

keiten festzustellen (rangieren). Der Schienenverlauf wird als Polylinie aus den der gefilterten Position der Kameras extrahiert. Hierbei wird ein fester Versatz (Kameraposition) in Betracht gezogen.

Die Gesamtstrecke ist durch mehrere Tunnel unterbrochen. In Abb. 5 zeigt die Abweichung einer Teilstrecke im Vergleich zu Daten aus *Open Street Map*. Die Teilstrecke wurde isoliert und mit den WGS-84 Daten überlagert (*lsqrt*, 80 % overlap). Auf der Eingangsgrade vor der ersten Kurve ist der Fehler groß. Der Abschnitt führt durch ein Waldstück mit Steigung und wurde bei erhöhter Geschwindigkeit aufgenommen. In Bereich der Hauptkurven sinkt der mittlere Fehler auf einen Wert von ca. 14 \overline{m} , wobei keine Höhendaten als Vergleich zur Verfügung stehen (ca. 30 m Höhenmeter im betrachteten Streckenabschnitt).

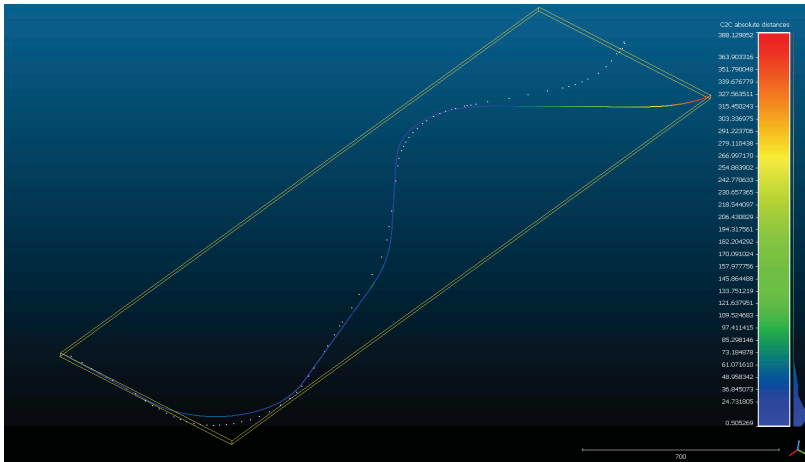


Abb. 5: Abweichung eines 2.7 km langen Streckenabschnitt zwischen Überlingen und Salem.

Im Gegensatz zu der Länge der Bewegungsvektoren korrelieren die Richtungen mit den WGS-84 Daten. Besonders in Bereichen von besonderem Interesse (Bahnhöfe, Siedlungen und Kurven) sinkt der Fehler beträchtlich. Diese Verzerrung kann in der Rekonstruktion der gesamten Strecke bei allen Teilmodellen (Tunnel – Tunnel) gemessen werden. Für ein erstes Alignment wurde das lokale Koordinatensystem der Rekonstruktion in ein Global gültiges Koordinatensystem überführt. Hierbei wurde der Startpunkt in WGS-84 angemessen (via Karte) und die Punkte projiziert. Um die Höhe abzubilden wurde das Koordinatensystem WGS-84 mit der höhen Information im EGM2008 erweitert. Die Höhe des initialen Punktes wurde aus der Stadtkartei von Singen übernommen. Das so entstandene Modell besteht aus einer 3D-Raumkurve (3D-Alignment) und kann von gängigen Planungstools für Infrastruktur eingelesen werden.

4 Verbesserung der Erkennung

4.1 Filterung beweglicher Objekte

Das Alignment wird ausschließlich durch die Verortung der Kamerapositionen bestimmt. Damit hängt die Genauigkeit des Alignments direkt von dem Abgleich der Features zwischen den Bildern ab. Im Falle von Führerstandsaufnahmen sind nicht alle Objekte stillstehend, was bei der Optimierung, welche die Kamerapositionen bestimmt, einen signifikanten

Fehler induziert. Jeder entgegenkommende Zug führt direkt zu einer messbaren Abweichung.

Eine Lösung für dieses Problem ist eine kontextbasierte Filterung der Keypoints, nach dem Feature-Extraction-Schritt. Um die Features von sich bewegenden Zügen zu entfernen muss dieser zuerst auf den Bildern erkannt werden. Für die Objekterkennung wurde ein CNN benutzt. Wird ein Zug erkannt, wird dieser maskiert und die Keypoints mit dem Zugbereich des Folgebildes abgeglichen. Verändert sich die Perspektive dieses Objektes, d.h. verändern sich die zugrunde liegende Transformationsmatrix stärker als der außenliegende Bereich (der Zug bewegt sich), werden diese Punkte verworfen. Die Keypoints stehen im Matching-Schritt des SfM nicht mehr zur Verfügung und induzieren keinen weiteren Fehler. Im Fall unserer Bodenseegürtelbahn, wurde die Erkennung der Züge mit YOLO durchgeführt und eine sehr gute Erkennungsrate erzielt. Ein Beispiel für eine *Objektdetection* auf einem Einzelbild ist in **Abb. 6** dargestellt.



Abb. 6: Objekterkennung mit Yolo.

4.2 Unbewegliche Komponenten des Schienenfahrzeugs

Ein weiterer Fehler entsteht durch nicht veränderlichen Teile des Bildes. Deutlich zu sehen ist der Scheibenwischer der Lok (**Abb. 6**), weniger deutlich die Kratzer und Partikel auf der Scheibe. Die Lösung hierbei ist eine Ähnliche wie bei den beweglichen Objekten. Durch eine Analyse nicht veränderlicher Bildelemente, z.B. mit einem binären Vergleich (&) von zufällig ausgewählten Bildern, können nicht wiederkehrenden Elemente identifiziert werden. Das Filtern erfolgt analog zu 4.1.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird ein praktisches Beispiel von der Anwendung von SfM im Bereich Schieneninfrastruktur beschrieben. Das Paper beschreibt die besondere Herausforderung eines sehr umfangreiche Verarbeitung von 85 km Bahnstrecke anhand eines beschränkten linearen Datensatzes. Die Ergebnisse sind gemischt. Während die Orientierung der Lok sehr gut wiedergeben wird, besteht im Bereich von Graden starke Abweichungen der Translation. Die Verarbeitung von ca. 85 km Bahnstrecke unseres Beispiels führt zu einem deutlichen Fehler, welcher mit Passpunkten oder einer anderen Referenz gestützt werden muss.

Durch die Verwendung dieses Verfahrens als zusätzlichen Datenquelle und den Abgleich der Kameraposition mit der Position der Schienenpunkte kann ein lokal verbessertes Alig-

nement erstellt und die Dynamik des Zuges ausgewertet werden. Zukünftige Schwerpunkte könnte die Ableitung von in der LuVF definierten Qualitätskennzahlen aus diesen Daten und damit eine Aussage über den Zustand der Bahnstrecke sein. Um das globale Alignment zu verbessern sind verschiedene Verfahren zu evaluieren: 1.) Passpunkte, welche einzeln im 3D Raum angemessen werden. Die Punktwolke wird also nach der Erstellung entsprechend korrigiert. 2.) Verwendung von angemessenen Punkten bei der Rekonstruktion. Dabei ist es nötig, dass das System verschiedene Punkte erkennt und in Bildern korrekt verortet. Hierbei könnten eingemessen Bahnausrüstungsgegenstände, welche mit QR-Codes markiert werden, genutzt werden. Diese Funktionalität wird allerdings von keiner bestehenden SfM-Software unterstützt und erfordert starke Eingriffe. 3.) Zusätzliche Informationen über Luft- und Satellitenbilder, welche bei der Rekonstruktion für einen zusätzlichen Informationen sorgen. Besonders die Wahl der Matching-Strategie ist hier hinsichtlich der Anwendbarkeit (Performance) von großem Interesse.

Literatur

- AIVARS, A., ROODE, L. & TARVO, M. 2013. Combined 3D building surveying techniques - terrestrial laser scanning (TLS) and total station surveying for BIM data management purposes. *Journal of Civil Engineering and Management* 19, S23-S32.
- AMANN, J. & BORRMANN, A. 2015. Open BIM for Infrastructure – mit OKSTRA und IFC Alignment zur internationalen Standardisierung des Datenaustauschs.
- BORRMANN, A., HOCHMUTH, M., KÖNIG, M., LIEBICH, T. & SINGER, D. 2017. Germany's governmental BIM initiative—Assessing the performance of the BIM pilot projects.
- BOSCHÉ, F. N., HAAS, C. & MURRAY, P. 2008. Performance of automated project progress tracking with 3D Data fusion. *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, 2008.
- BUNDESHAUSHALTSPLAN 2017. BHPl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 29ff. 2017. Online Supplementary Material at <https://www.bundeshaushalt-info.de>.
- DIMITROV, A. & GOLPARVAR-FARD, M. 2014. Vision-based material recognition for automated monitoring of construction progress and generating building information modeling from unordered site image collections. *Advanced Engineering Informatics* 28, 37–49.
- DU, J.-C. & TENG, H.-C. 2007. 3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation. *Automation in Construction* 16, 657–63.
- MATHEISEN, A., REINHARDT, P. & REICHERT, M. 2018. OpenRailwayMap.
- MORITZ HERRMANN. 2015. Schienen, die die Welt bedeuten. Online Supplementary Material at <http://reportagen.fm/schienen-die-die-welt-bedeuten/>.
- ÖZYEŞİL, O., VORONINSKI, V., BASRI, R. & SINGER, A. 2017. A survey of structure from motion. *Acta Numerica* 26, 305–64.
- REDMON, J., DIVVALA, S., GIRSHICK, R. & FARHADI, A. (eds). 2016. You only look once: Unified, real-time object detection, 779-788.
- ROTAUSLEUCHTUNG. Führerstandsmitfahrt BR 232 - Bodenseegürtelbahn von Singen nach Friedrichshafen, 2018. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=NAB-4x5wHTo>.
- SAURER, O., POLLEFEYS, M. & HEE LEE, G. (eds). 2016. Sparse to dense 3d reconstruction from rolling shutter images, 3337-3345.

- SCHMID, C., SOATTO, S. & TOMASI, C. (eds). 2006. 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops: CVPR Workshops ; New York, New York, USA, 17 - 22 June 2006. IEEE, 8 pp.
- SCHONBERGER, J. L. & FRAHM, J.-M. 27.06.2016 - 30.06.2016. Structure-from-Motion Revisited Paper presented at the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, Jun. 27-30.
- SCHÖNBERGER, J. L., ZHENG, E., FRAHM, J.-M. & POLLEFEYS, M. 2016. Pixelwise view selection for unstructured multi-view stereo. ECCV & European Conference on Computer Vision, Lecture notes in computer science no. 9907.
- TOTH, T., RAJTUKOVA, V. & ZIVCAK, J. 2013. Comparison of optical and laser 3d scanners Paper presented at the 2013 IEEE 14th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI), Budapest, Hungary, 11/19/2013 - 11/21/2013.

Multimodales Datenbanksystem als Basis zur Verwaltung und Visualisierung großvolumiger spatio-temporaler Umweltdaten – Umsetzung am Beispiel des Projektes RiverView®

Nicole Hein

Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme · RWTH Aachen
University · Mies-van-der-Rohe-Straße 1 · 52074 Aachen
E-Mail: nicole.hein@gia.rwth-aachen.de

Im BMBF-Projekt RiverView® wird ein soft- und hardwaregestütztes System zum ganzheitlichen Monitoring von kleinen und mittleren Fließgewässern entwickelt. Dabei werden mit einem unbemannten Messboot (RiverBoat) verschiedene Gewässerparameter sensorgestützt erfasst. Die resultierenden heterogenen Gewässerdaten müssen daher in einem geeigneten Datenbankmanagementsystem gespeichert werden.

Mit Hilfe einer omnidirektionalen RGB-Kamera an Bord des Messbootes werden 360°-Aufnahmen von der Gewässerumgebung gemacht. Diese Aufnahmen werden weiterverwendet, um sie für den Nutzer in einem 360°-Panorama-Viewer zu visualisieren.

Keywords: Rasdaman, PostgreSQL, 360°-Viewer, Gewässermonitoring, multimodale Datenbank

1 Einleitung und Motivation - Das Projekt RiverView®

Das Monitoring kleiner und mittlerer Fließgewässer gestaltet sich schwierig, da die Datengewinnung auch heute noch durch Begehung, klassische Vermessung und manuelle Probenentnahme erfolgt. Dabei mangelt es vor allem an einer kontinuierlichen, flächenhaften Aufnahme des Gewässers und dessen Ufer, da derzeit diese Bereiche bestenfalls punktuell mit Hilfe von einzelnen Bildaufnahmen dokumentiert werden.

Das Forschungsprojekt RiverView®, vom BMBF gefördert unter der Maßnahme „Regionales Wasser-Ressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland (ReWaM)“ mit dem Schwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement (NaWaM)“, dient dazu, genau diese Lücke zu schließen (vgl. u.a. KUTSCHERA et al. 2017, KUTSCHERA et al. 2018, BLANKENBACH et al. 2018). Es bietet ein ganzheitliches Gewässermonitoring durch die Entwicklung eines unbemannten Katamarans (Abb. 1), der während einer Messfahrt kontinuierlich zeitlich und räumlich referenzierte Daten des Gewässers sammelt. Mit Hilfe eines omnidirektionalen Kamerasystems *LadyBug 5* wird die Umgebung zudem bildlich dokumentiert. Es entsteht während einer Messfahrt eine lückenlose Aufzeichnung mit Sensordaten (z.B. O₂-Gehalt, pH-Wert, Temperatur) sowie Bilddaten der Gewässerumgebung.

Um diese Daten zu persistieren und sie später anderen Nutzern, z.B. über ein webgestütztes Gewässerinformationssystem, effizient zur Verfügung stellen zu können, wird für RiverView® ein multimodales Datenbanksystem aufgebaut, dass in der Lage ist, einerseits mit den großen Datenmengen und andererseits mit der Heterogenität der Daten umzugehen.



Abb. 1: RiverBoat, entnommen aus www.tinyurl.com/y9s7pgp5

2 Multimodales Datenbanksystem

Ein multimodales Datenbanksystem stellt allgemein eine Kombination von verschiedenartigen Datenbanksystemen dar. Dies können (objekt-)relationale, objektorientierte oder auch NoSQL-Datenbanken sein.

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau eines multimodalen Datenbanksystems für das Projekt RiverView®.

2.1 Aufbau

Um ein geeignetes Datenbanksystem für RiverView® aufzubauen, ist es erforderlich, zunächst eine Analyse der Datentypen der vom Messkatamaran erfassten Daten durchzuführen. Die Datenanalyse führt zu einem UML-Datenmodell. Aus diesem Modell können nicht nur die Struktur, sondern auch die Datenbankdatentypen jedes Datensatzes abgeleitet werden.

Aus dem vorliegenden UML-Modell lässt sich ableiten, dass vom Messkatamaran neben skalaren Datentypen, wie Sauerstoff- und pH-Wert, ebenso Bilddaten durch die omnidirektionale Kamera des Bootes als auch Echolot-Daten gesammelt werden.

Um diese Vielzahl von heterogenen Datensätzen bewältigen zu können, benötigt es ein Datenbanksystem, das in der Lage ist, die jeweiligen Datensätze effizient zu verwalten. Aus diesem Grund wurde sich zur Speicherung von Sensor- und nutzerbezogener Daten für das Datenbankmanagementsystem PostgreSQL (POSTGRESQL 2018) und zur Speicherung der Bilddaten für die Middleware Rasdaman entschieden (RASDAMAN 2018).

2.1.1 PostgreSQL

PostgreSQL ist das wohl bekannteste Datenbankmanagementsystem im Zusammenhang mit Geoinformation. PostgreSQL integriert zahlreiche Funktionen und Features für die

Speicherung von Geodaten, wie z. B. Geometriedatentypen oder auch die Verwaltung von Koordinaten verschiedener Koordinatenreferenzsysteme. Des Weiteren ist PostgreSQL als objektrelationale Datenbank in der Lage, komplexe Objekte zu verarbeiten. Durchgeführte Tests zeigten jedoch, dass PostgreSQL in Verbindung mit der Erweiterung PostGIS und PostGIS Raster für großvolumige Bilddaten (POSTGIS 2018), wie sie in RiverView® auftreten, nicht geeignet ist (HEIN & BLANKENBACH 2017).

2.1.2 Rasdaman

Rasdaman ist eine Middleware, die es ermöglicht, insbesondere großvolumige Rasterdatenbestände, wie Bilddaten, raum- und zeitbezogen zu persistieren. Abb. 2 zeigt die Architektur von Rasdaman. Im Zentrum von Rasdaman steht der sogenannte RasServer, der eine Anbindung an die Datenbank bzw. an das Dateisystem bereitstellt. Mit Hilfe der Geodienste des OGC (z.B. Web Coverage Service (WCS) oder Web Coverage Processing Service (WCPS)) können die persistierten Daten dem Nutzer wieder zur Verfügung gestellt werden. Rasdaman ist zudem eine offizielle OGC WCS Core Referenzimplementierung (OGC 2018).

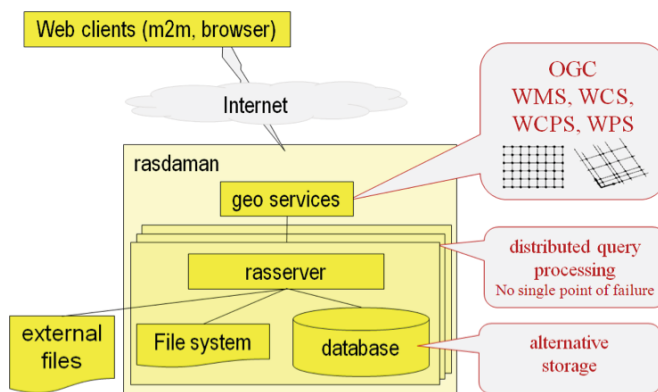


Abb. 2: Rasdaman: Aufbau, entnommen aus RASDAMAN 2018

Rasdaman arbeitet mit den Schichten „Applikation“ und „Server“, wobei die Middleware selbst auf dem Server liegt und dafür sorgt, dass die Daten in ein Datenbankmanagementsystem via Web-Clients (z. B. Browser) gespeichert werden. In der Applikationsschicht hingegen werden die Bilddaten (in Rasdaman: MDD – Multidimensional Data) und deren Metadaten (Alphanumeric Data) bereitgestellt.

Rasdaman nutzt zur Speicherung und Verwaltung der Daten eine an SQL angelehnte eigens für Rasdaman entwickelte Sprache namens RaSQL.

2.1.3 Kopplung und Persistierungsvorgang

Damit PostgreSQL und Rasdaman miteinander kooperieren können, wurde eine Middleware entwickelt, die zwischen beiden Systemen sowohl beim Import als auch beim Export Informationen vermittelt.

Beide Systeme wurden auf einer Serverinstanz installiert, wobei Rasdaman ebenso Metadaten in einem Schema der PostgreSQL-Datenbank speichert. In einem neuen Schema werden die Nutzerdaten (Name, E-Mail, Passwort, letzter Login) sowie die skalaren und vektoriellen Sensordaten persistiert. Werden Bilddaten für den Import bereitgestellt, so werden die Metadaten (Zeitstempel, Position, Neigungswinkel, Dateiname und die Track-ID) in PostgreSQL gespeichert, bevor ein Upload in Rasdaman vorgenommen wird.

Über ein serverseitiges PHP-Skript werden die Bilddaten zunächst auf den Server geladen, bevor dann ein sogenanntes Rezept erstellt wird, um einen Import der Bilddaten über einen transaktionalen WCS (WCS-T) in Rasdaman durchzuführen. Dieses Rezept enthält alle erforderlichen Informationen, wie die Größe der Bilddaten, die zugehörige Track-ID, die Auflösung und die Art der Kachelung (Tiling). Über ein weiteres PHP-Skript, das nach dem Upload der Bilddaten und der Erzeugung des Rezeptes aktiviert wird, wird der WCS-T-Import angestoßen. Durch diese Art des Imports ist es möglich, Coverages (d. h. Sammlungen von Bilddaten einer Messfahrt) in Rasdaman via Web-Anfragen zu verwalten (Insert, Delete, Update).

2.2 Schnittstellen

Um von außen auf die Datenbanksysteme PostgreSQL bzw. Rasdaman zuzugreifen, liegen, je nach Anwendungsfall, verschiedene Konzepte zugrunde.

Sofern sich ein Nutzer über das RiverView-Softwaretool registriert, ist er in der Lage, je nach Rechteverteilung, Daten in die Datenbank zu importieren bzw. diese als JSON-Format aus der Datenbank herunterzuladen.

Zurzeit existieren vier verschiedene Nutzerarten: Der Administrator ist in der Lage, auf jegliche Daten (Nutzer- Sensor- und Bilddaten) zuzugreifen und sie zu manipulieren. Der darunter gestellte Nutzer „write“ kann Sensor-/Bilddaten einsehen und sie manipulieren, hat aber keinen Zugriff auf Nutzerdaten. „select“ hingegen kann Daten nur Lesen und ist somit nicht in der Lage, einen Daten-Upload in die Datenbank vornehmen. Damit die Nutzer sich am System mit einer E-Mail-Passwort-Kombination anmelden können, wird eine weitere Nutzerart eingesetzt, die nur lesenden Zugriff auf die Nutzerdaten hat.

Ein Zugriff auf die Daten von Rasdaman wird durch den WCS gewährleistet. Dort können Coverages WCS-typisch mittels http und den Operationen GetCoverage, ProcessCoverage und InsertCoverage verwaltet werden.

Ein besonderes Konzept zum Zugriff auf die Daten in der Datenbank ist mit dem 360°-Viewer gegeben, da auch nicht registrierte Nutzer diesen nutzen können.

3 360°-Viewer

Der 360°-Viewer (Abb. 3) ermöglicht es dem Nutzer, sich in einer Welt aus Bildpanoramen zu bewegen. Dabei soll ihm das Gefühl gegeben werden, als würde er sich in der realen Welt bewegen.

3.2.1 Bildpyramide

Würde das gesamte Panorama einer Aufnahme position in den 360°-Viewer geladen werden, so hätte der Nutzer zunächst lediglich einen schwarzen Bildschirm vor sich – je nach Größe und Auflösung des Bildes bis zu neun Sekunden (Test mit Panoramen, geladen aus Rasdaman mit einer Größe von 8000x4000 Pixeln, einer Bittiefe von 24 und einer vertikalen und horizontalen Auflösung von 96 dpi im Bildkompressionsformat JPEG). Dies trifft ebenfalls zu, wenn der Nutzer durch die verschiedenen Panoramen navigiert. Eine Wartezeit von mehreren Sekunden ist für einen interaktiven Bildviewer, besonders in Hinblick auf die zukünftige Weiterentwicklung als VR-/AR-Anwendung, nicht akzeptabel.

Eine Bildpyramide enthält mehrere Ebenen eines Bildes, die in verschiedenen Auflösungen des Originals vorliegen. Rasdaman bietet die Möglichkeit, das gespeicherte Bild in verschiedene Stufen zu skalieren. Diese Qualitätsstufen werden ausgenutzt, um dem Nutzer schneller ein Bild darzustellen, auch wenn dieses noch unscharf wirkt. Des Weiteren kann durch Rasdaman ausgewählt werden, welcher Bildbereich heruntergeladen werden soll.

In der Anwendung des Viewers werden folgende Faktoren der Skalierung genutzt: 1 (Originalauflösung – 8000x4000, 96 dpi, 24 bit), 0.5 (Hälfte des Originals – 4000x2000, 96 dpi, 24 bit) und 0.1 (ein Zehntel des Originals – 800x400, 96 dpi, 24 bit).

Abbildung 4 zeigt ein Diagramm, welches darlegt, wie sich das Laden eines kompletten Bildpanoramas gegenüber dem Laden von Teilbildern bis zur Komplettierung verhält.

Auf der Ordinate ist die Zeit in Sekunden angegeben, die das Bild benötigt, bis es komplett in die Anwendung geladen wurde. Die Abszisse zeigt die Skalierungsfaktoren 1 (Original), 0.5 (Hälfte des Originals), 0.1 (ein Zehntel des Originals).

Die gestrichelte Linie zeigt den Verlauf der Ladezeit an, wenn ein komplettes Bild (keine Teilung) heruntergeladen wird. Die durchgezogene Linie hingegen zeigt die Zeit, in der ein geteiltes Bild (Teilgröße beträgt immer 1000x1000 Pixel) bis zur Komplettierung in die Anwendung geladen werden konnte.

Es ist zu erkennen, dass ab einem Skalierungsfaktor von 0.5 das Laden von Teilstücken immer länger dauert als das Laden des kompletten nicht geteilten Bildes. Allerdings können bei einem Skalierungsfaktor von 0.5 trotzdem Teilstücke angefordert werden, da dies immer noch schneller ist, als das komplette Bild auf die Kugel zu mappen: Jedes Teilstück benötigt durchschnittlich 90 ms zum Download. Für das Sichtfeld des Nutzers werden sechs bis acht Teilstücke benötigt. Werden nur die Teilstücke des Bilds geladen, auf die der Nutzer blickt, ergibt sich für ihn somit eine durchschnittliche Wartezeit von 540 bis 720 ms. Genauso verhält es sich bei einem Skalierungsfaktor von 1: Bei einer Ladezeit von 115 ms pro Teilstück wartet der Anwender durchschnittlich 690 bis 920 ms.

Aus diesem Grund wurde sich für folgende Variante im 360°-Viewer entschieden: Zunächst wird ein Vorschaubild mit geringer Auflösung geladen, danach wird berechnet, in welche Richtung der Nutzer blickt, um genau die Teile des Bildes mit Skalierungsstufe 0.5 nachzuladen. Sind diese komplett nachgeladen, wird die originäre Auflösung auf die Kugel gemappt. Die Dauer vom Start der Applikation bis zur originären Darstellung des gewünschten Panoramas beträgt durchschnittlich 2.3 bis 2.7 Sekunden, wobei dem Anwender schon nach ca. einer Sekunde zumindest ein Vorschaubild der Umgebung vorliegt.

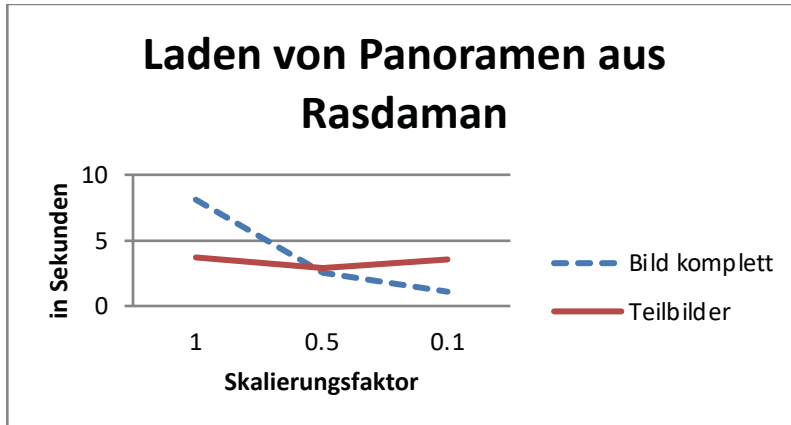


Abb. 4: Laden von Panoramen unter verschiedenen Skalierungsfaktoren

3.2.2 Berechnung der 3D-Koordinaten

Neben der Sphäre und der Panorama-Textur, die durch Three.js gegeben sind, werden zudem die Erfassungspositionen der Gewässerparameter (O₂-Gehalt, pH-Wert etc.) eingeblendet.

Da die Georeferenzierung aller Daten im GNSS-Koordinatenreferenzsystem erfolgt und sich damit vom Koordinatensystem der virtuellen Kamera von Three.js unterscheidet, muss eine Koordinatentransformation zwischen beiden Systemen vorgenommen werden.

Hierfür wird eine Rotationsmatrix benötigt. Diese setzt sich zusammen aus UTM-Koordinaten und Neigungswinkeln des aktuellen und denen des Referenzpanoramas, dessen Position im 360°-Viewer angezeigt werden soll.

Zunächst werden alle Werte der Neigungswinkel in Grad umgewandelt, bevor Differenzen gebildet und diese normiert werden. Nachdem die Rotationsmatrix errechnet wurde, wird eine Matrixmultiplikation mit den normierten Werten durchgeführt. Werden diese drei Werte mit dem Radius der Kugel multipliziert, so ergibt sich ein 3D-Punkt, der im Koordinatensystem der virtuellen Kamera von Three.js dargestellt wird.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Persistierung der Daten des Gewässermonitoring-Systems RiverView wurde ein multimodales Datenbanksystem, bestehend aus einer objektrelationalen (PostgreSQL) und einer Rasterdatenbank (Rasdaman), aufgebaut. Wichtig hierbei war, dass beide Systeme miteinander kommunizieren können, um einen nahtlosen Datenaustausch für den Nutzer zu gewährleisten.

Eine zentrale Softwareapplikation, die an dieses bimodale System angebunden ist, ist ein interaktiver 360°-Viewer, mit dem der Anwender in der Lage ist, die erfassten Bildpanoramen sowie die georeferenzierten Messdaten als Rundumblick zu betrachten. Hierbei wurde

vor allem auf Performance beim Laden der Bilder geachtet, um die Latenzzeiten für den Nutzer so kurz wie möglich zu halten.

Zukünftige Weiterentwicklungen adressieren die Umsetzung von Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) auf Basis derselben Plattform. Für den Nutzer bedeutet dies, dass er in der Lage ist, sich mit einer Datenbrille das Gewässer in 3D virtuell anzusehen bzw. mit einem Handy direkt Ort Daten aus Messfahrten unmittelbar in Angesicht des Gewässers zu visualisieren.

Literatur

- BLANKENBACH, J., SCHWERMANN, R. & HEIN, N. (2018), Raum-zeitliche Geoinformation für die Wasserwirtschaft 4.0. acwa aktuell, Ausgabe 16 - 01/2018, S. 17, acwa – Aachen Wasser, Selbstverlag.
- HEIN, N. & BLANKENBACH, J. (2017), Vergleich von PostGIS und Rasdaman als Geodatenbank für großvolumige Bilddatenbestände eines mobilen Mappingsystems. In: Beiträge zum AGIT-Symposium 2017, S. 2, doi:10.14627/537633001, Salzburg, Juli 2017.
- KUTSCHERA, G., BLANKENBACH, J., BOLLE, F.-W., JAGOW, M.-L., SIVICKI, T. & WIRTZ, J. (2018), RiverView® – innovatives Gewässermonitoring mit unbemannten mobilen Messtechniken. In: Pinnekamp J. (Hrsg.): Wasserwirtschaft im Umbruch – Proceedings der 51. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Schriftenreihe „Gewässerschutz - Wasser - Abwasser“, Vol. 247, 17/1-17/7. Aachen: Ges. z. Förderung d. Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., ISBN 978-3-938996-45-4, Aachen.
- KUTSCHERA, G., SCHWERMANN, R., BLANKENBACH, J., HELLER, G. & BOLLE, F.-W. (2017), RiverView® - Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Datenerfassung zur Gewässerbewirtschaftung. wasserwirtschaft-wassertechnik (wwt), 09/17, Huss-Medien-GmbH, Berlin, ISSN 1438-5716, 15 Seiten.
- OGC (2018), www.opengeospatial.org/standards (15.06.2018).
- POSTGIS (2018), www.postgis.net/ (11.06.2018).
- POSTGRESQL (2018), www.postgresql.org/ (11.06.2018).
- POSTGREST (2017), www.postgrest.org/en/v5.0 (11.06.2018).
- RASDAMAN (2018), www.rasdaman.com/product.php (22.05.2018).
- THREE.JS (2018), www.threejs.org/ (16.05.2018).

Session 4:

Informationsverwaltung und Datenmodellierung 2

Formulierung und Generierung von Expertenwissen zur Entwicklung intelligenter Ersatzmodelle für die Tragwerksplanung in frühen Entwurfsphasen

Daniel Steiner

Universität Duisburg-Essen · Institut für Massivbau · Universitätsstr. 15 · 45141 Essen ·
E-Mail: daniel.steiner@uni-due.de

In frühen Entwurfsphasen basiert die Tragwerksplanung lediglich auf wenigen und unscharfen Parametern. Dennoch impliziert das Tragwerkskonzept einen wesentlichen Einfluss auf den Entwurf sowie die Faktoren Zeit und Kosten eines Bauwerks. Zur frühen Integration des hochkomplexen tragwerksplanerischen Entscheidungsprozesses ist die Implementierung von einsetzbarem Expertenwissen des Ingenieurwesens erforderlich. Dafür werden intelligente Ersatzmodelle für den Tragwerksvorentwurf entwickelt, die auf detaillierungsgradabhängigen unscharfen Wissensbanken basieren. Die Formulierung des enthaltenen Ingenieurwissens mit Methoden der Fuzzy Logic erlaubt dabei die Verwendung von linguistischen Variablen und verständlichen Expertenregeln. Zur Entwicklung zugehöriger Inferenzsysteme für die Ersatzmodelle werden die grundlegenden Wissensbanken mit Parameterstudien generiert und ergänzende Abbildungsvorgänge durch Optimierungen komplementiert.

Keywords: Formulierung von Ingenieurwissen, Wissensbasis zur Tragwerksplanung, detaillierungsgrad-abhängige Wissensbanken, Fuzzy Logic Inferenzsysteme, intelligente Ersatzmodelle.

1 Einleitung

Der Vorentwurf von Bauwerken basiert im Wesentlichen auf gestalterischen und funktionalen Aspekten, die nur wenige grobe Ansätze für den Entwurf der Struktur erlauben. Dazu zählen überschlägige Formeln und der Erfahrungsschatz der Entwurfsverfasser. Der erfolgreiche Entwurf von Bauwerken erfordert jedoch die möglichst frühe Integration wesentlicher tragwerksplanerischer Parameter in den Entwurfsprozess. Diese werden auf Basis grundlegender Spezifikationen ermittelt, dazu zählen die Raumanordnung, die Nutzungskategorie und die Gebäudeausstattung. Zu diesem Zeitpunkt sind zwar nur wenige Randbedingungen für die folgende Vorentwurfsplanung bekannt. Dennoch müssen in dieser Phase maßgebliche konstruktive Entscheidungen getroffen werden, die einen hohen Einfluss auf die weitere Projektbearbeitung und Baumaßnahme aufweisen (ZHANG et al. 2018). Die Faktoren Zeit und Kosten sind insbesondere im Bereich des öffentlichen Bauens und der Großinvestitionen von maßgebender Relevanz (KIM et al. 2015). Demzufolge ist die Integration von tragwerksplanerischen Entwurfskriterien in die frühen Phasen des Planungsprozesses äußerst empfehlenswert (SCHNELLENBACH-HELD & HARTMANN 2003). Dafür ist die frühestmögliche Zusammenarbeit aller beteiligten Planer notwendig (EL-DIRABY et al. 2017). Weitere Kriterien dieses Prozesses sind eine zuverlässige Erzeugung angemessener Entwürfe und die Vermeidung von kosten- und zeitintensiven Entwurfszyklen. Dabei ist der Einsatz von geeignetem tragwerksplanerischen Ingenieurwissen in den frühen architek-

tonischen Entwurfsprozess (Vor- und Entwurfsplanung) erforderlich. Zusätzlich zu der Formulierung von Ingenieurwissen und technischer Aspekte erfordert die Entwicklung einer Wissensbasis ausführliche Tragfähigkeitsanalysen und Simulationen (LIU et al. 2018). Des Weiteren muss ein System zur Unterstützung des Vorentwurfs die Fähigkeit besitzen, Tragwerkslösungen auf Basis unscharfer Parameter und Spezifikationen zu verarbeiten und vorzuschlagen (SCHNELLENBACH-HELD & ALBERT 2003). Modelle zur Integration der Tragwerksplanung in den frühen architektonischen Entwurf, die zu einer umfassenden Unterstützung des Vorentwurfs führen könnten, existieren bisher nicht. Ein Hauptgrund dafür ist vermutlich die Notwendigkeit von Entscheidungen, die auf wenigen und unscharfen Randbedingungen beruhen. Deshalb und aufgrund der enthaltenen Komplexität und dem erforderlichen Erfahrungswissen können diese Entscheidungsprozesse nicht ohne weiteres abgebildet und automatisiert werden. Zusätzlich ist das relevante Expertenwissen mit zugehörigen unterschiedlichen Detaillierungsstufen des Entwurfs verbunden. Daraus resultiert der Bedarf an einsetzbaren Entwicklungsstufen sowie zugehörige Anforderungen an Parametern und Modifikationen (MAIER et al. 2017). Die resultierende komplexe Aufgabe der Entscheidungsunterstützung in frühen Phasen ist jedoch mit Systemen realisierbar, die auf detaillierungsgradabhängigen unscharfen Wissensbanken basieren (SCHNELLENBACH-HELD et al. 2006).

2 Intelligente Ersatzmodelle für die Tragwerksplanung

Für eine frühe Entscheidungsunterstützung werden intelligente Ersatzmodelle für den Tragwerksentwurf entwickelt, die eine Harmonisierung und Effizienzsteigerung im Entwurfsprozess von Bauwerken ermöglichen. Zur Generierung der Modelle werden adaptive Detaillierungsstufen (Adaptive Levels of Development, ALoD) für den tragwerksplanerischen Vorentwurf entwickelt und der erforderliche Informationsbedarf analysiert. Die Ersatzmodelle basieren auf detaillierungsgradabhängigen unscharfen Wissensbanken und zugehörigen Inferenzsystemen. Diese enthalten umfangreiches einsetzbares Ingenieurwissen sowie dessen Formulierung mit Methoden der Fuzzy Logic. Die eingesetzten Technologien erlauben zusätzlich die Verarbeitung unscharfer Gebäudeinformationen. Das resultierende System ermöglicht die Realisierung einer Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der Tragwerksplanung und Modifikationsprozesse in frühen Phasen. Folglich werden Projektplaner mit Werkzeugen für eine frühe Unterstützung von komplexen Planungsentscheidungen ausgestattet, die eine hohe Effizienzsteigerung erlauben. Dazu zählen die Empfehlung realisierbarer und ökonomisch optimierter Entwürfe sowie deren Vordimensionierung. Dadurch können zeit- und kostenintensive Entwurfszyklen sowie baubegleitende tragwerksplanerisch oder ausführungstechnisch begründete Umplanungen vermieden werden.

2.1 Adaptives Detaillierungssystem

Zur Berücksichtigung aller Anforderungen für den Tragwerksentwurf wird ein Detaillierungssystem eingesetzt, das fünf grundlegende adaptive Detaillierungs- bzw. Entwicklungsstufen (Adaptive Levels of Development, ALoD) umfasst. Zusätzlich werden Transferfunktionen eingeführt, die aus begrenzten Informationen des niedrigeren ALoD die benötigten Daten für das nächst höhere ALoD ermitteln (siehe Tabelle 1). Als Startpunkt für den Entwurfsprozess wird das „ALoD 0“ als „Blackbox“ definiert. Dieses enthält lediglich globale Informationen und Umweltbedingungen. Dazu zählen der Standort, die Exposition,

die Nutzungskategorie, Bodenverhältnisse und Baugelände sowie beschreibende Flächen der Außenbauteile für die Art und Dimensionen des Gebäudes. Diese Ebene wird zur Ermittlung der Randbedingungen, wie Einwirkungen und Bettung, sowie zur architektonischen Entwicklung des Raumprogramms verwendet. Der daraus resultierende Grundriss ist Inhalt des „ALoD 1“, das die geometrischen Parameter aller Komponenten des Gebäudes enthält. Dazu zählen Geschosshöhen, das Konstruktionsraster und komplementäre geometrische Spezifikationen der Komponenten. Basierend auf dem enthaltenen Tragsystem und dessen Geometrien wird eine Positionierung vorgenommen. Diese enthält die Idealisierung der enthaltenen Tragwerkskomponenten entsprechend konventioneller Berechnungsansätze. Für den resultierenden Positionsplan wird das „ALoD 2a“ eingeführt. Dieses bindet berechenbare Tragstrukturen sowie zugehörige Parameter wie Längen, Lasten und Auflagerbedingungen in das Modell ein. Anschließend wird die Realisierbarkeit und Optimalität der einzelnen Positionen und möglicher Konstruktionstypen (Possibilität) durch die zugehörigen entwickelten Ersatzmodelle ermittelt. Zur Formalisierung der Possibilität wird ein Parameter eingeführt, der einen fließenden Wertebereich im Intervall von 0,0 für „nicht realisierbare“ über 0,5 für „mögliche“ bis 1,0 für „optimale“ Konstruktionstypen aufweist. Die Integration dieses Wertes in das Modell führt zum „ALoD 2b“ als Possibilitätsplan. Dieser enthält die Möglichkeitswerte für die implementierten Konstruktionstypen der enthaltenen Positionen. Für die Strukturen mit höchster Possibilität werden anschließend die charakteristischen Entwurfsparameter durch die entwickelten Ersatzmodelle für den Vorentwurf ermittelt. Zu diesen Größen zählen insbesondere das genaue Material und ein abgeschätzter Bewehrungsgrad. Die Erweiterung des Modells um die Entwurfsparameter führt schließlich zum „ALoD 3“ für den tragwerksplanerischen Vorentwurf. Dieses enthält die wesentlichen konstruktiven Festlegungen sowie die grobe Dimensionierung der tragenden Elemente und somit die optimierte Tragwerkslösung für das Gebäude.

Tabelle 1: Detaillierungsebenen für den Tragwerksentwurf

ALoD	Bezeichnung	Inhalt
0	Blackbox	Globale Informationen und Umgebungsbedingungen
1	Geometrien	Raumaufteilung, Konstruktionsraster und Grundriss
2a	Positionen	Idealisierte Tragwerkselemente
2b	Possibilitäten	Eignung unterschiedlicher Konstruktionstypen
3	Vorentwurf	Vordimensionierte Tragwerkslösungen

Zur Berücksichtigung zusätzlicher Parameter, Abhängigkeiten der Detaillierungsgrade und Entwicklungsstufen des Modells wird das Detaillierungssystem mit Konzepten der adaptiven Detaillierung ausgestattet. Dazu zählen insbesondere nichtlineare Datenströme und formatkonforme Methoden, durch die einflussreiche Modellparameter unabhängig von den Transferfunktionen zwischen den LoDs abgefragt, ausgewertet oder beeinflusst werden können. Zusätzlich werden Schnittstellen bereitgestellt, die eine zuverlässige Integration individueller Informationen ermöglichen, beispielsweise für Einbau- oder Fertigteile. Des Weiteren wird durch anpassbare Verknüpfungen zwischen ALoDs und Transferfunktionen eine Integration zukünftiger weiterer Parameter, Detaillierungsstufen oder Ersatzmodelle berücksichtigt, beispielsweise ein neues Modell zur Empfehlung eines Konstruktionsrasters aus ALoD 0 oder ein neuer ALoD 4 für Aspekte der Ausführungsplanung.

2.2 Intelligente Ersatzmodelle

Das Konzept der entwickelten Ersatzmodelle basiert auf detaillierungsgrad-abhängigen Fuzzy-Wissensbanken für den tragwerksplanerischen Vorentwurf. Die Modelle gewährleisten eine schnelle Bereitstellung des enthaltenen Ingenieurwissens. Neben den verbindlichen Informationen aus Normen und Richtlinien berücksichtigen die entwickelten Wissensbanken zusätzlich das reine Ingenieurwissen. Insbesondere in frühen Entwurfsphasen nutzen Ingenieure nicht nur die in Normen verankerten Informationen, sondern viel mehr die Kompetenz, Expertise und Erfahrung, die sie im Laufe ihrer Berufstätigkeit erlangen konnten. Der damit verbundene Entscheidungsprozess für den Tragwerksentwurf basiert auf hochkomplexen Zusammenhängen. Dabei ist es kaum möglich, diese unter Verwendung herkömmlicher scharfer Definitionen und von „Hard-Computing“ nachvollziehbar zu formalisieren bzw. abzubilden. Die Verwendung unscharfer Grenzen und zugehöriger Inferenzsysteme ermöglicht jedoch die Formulierung des tragwerksplanerischen Ingenieurwissens. Sie erlauben eine kompakte und nachvollziehbare Darstellung von Problemen mit deren Lösungen, die andernfalls eine hochkomplexe Formulierung benötigen und nur schwer nachvollziehbar sind. Zur Entwicklung solcher Systeme für eine schnelle und transparente Entscheidungsfindung werden Modelle der Fuzzy Logic eingesetzt, die einsetzbare Wissensbasen und Inferenzregeln beinhalten. Die resultierenden Systeme emulieren den tragwerksplanerischen Vorentwurf unter Einsatz des formulierten Expertenwissens des Ingenieurwesens. Diese Ersatzmodelle werden für eine überschlägige Berechnung und vorläufige Dimensionierung von Tragwerken in Bezug auf das adaptive Detaillierungssystem entwickelt. Sie ermöglichen eine schnelle und akkurate Abschätzung der Realisierbarkeit und eines optimierten Vorentwurfs der Tragwerkselemente auf Basis weniger unscharfer Informationen. Ausgehend von den Fuzzy Wissensbanken für einzelne Tragwerkskomponenten werden die Ersatzmodelle als progressive Inferenzsysteme entwickelt. Die eingesetzten Regelbasen werden zusätzlich durch Optimierungen hergeleitet, die eine Auswahl der optimalen Tragwerkslösung aus möglichen Randbedingungen schlussfolgern. Durch die resultierenden Abbildungsregeln wird ein Mapping von Optima im Parameterraum der Wissensbanken realisiert. Dieses erlaubt die schnelle Ermittlung von optimalen Tragwerkskomponenten sowie den Vorentwurf dieser Lösungen. Das Inferenzsystem wird zusammengesetzt aus Abbildungsregeln, die in der intuitiv verständlichen Form des Modus Ponens „Wenn (Prämisse), dann (Konklusion)“ formuliert werden.

3 Expertenwissen für den Tragwerksentwurf in frühen Phasen

Die Grundlage der intelligenten Ersatzmodelle ist die Verwendung von umfassendem Ingenieurwissen für den Tragwerksentwurf. Zur Formalisierung dieses Expertenwissens werden funktionale Fuzzy-Modelle eingesetzt, die eine Formulierung unscharfer Parameter zulassen und eine regelbasierte Inferenz für Abbildungsvorgänge erlauben. Dafür werden zunächst detaillierungsgrad-abhängige Wissensbanken generiert, die auf umfangreichen Parameterstudien für den Tragwerksentwurf basieren. Diese repräsentieren eine weitläufige Bestimmung des Parameterraums aus allen notwendigen Entwurfsparametern und ergeben erste Abbildungsregeln für den Bauteilentwurf. Durch die entsprechende Inferenz der resultierenden Wissensbanken werden anschließend die Ersatzmodelle entwickelt, die zuverlässige Informationen zu Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Ökonomie einer Trags-

struktur aus einem begrenzten Informationsangebot ermitteln. Eine Weiterentwicklung der Inferenzsysteme wird durch Optimierungen erreicht, die ein Mapping von Optima im Entwurfsraum erzeugen. Dadurch wird die Evaluierung optimierter Tragwerkslösungen sowie die Ermittlung von Abbildungsregeln in niedrigeren Detaillierungsstufen ermöglicht.

3.1 Funktionale Fuzzy-Inferenz-Systeme zur Wissensdarstellung

Fuzzy Logic Inferenzsysteme sind verbreitete Lösungen des Soft-Computing für Entscheidungsprozesse im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI). Sie ermöglichen die computertechnische Erfassung hochkomplexer und sogar nicht modellierbarer Systeme durch die enthaltene unscharfe Kategorisierung, die mit linguistischen Formulierungen dargestellt wird. Dadurch wird insbesondere die Einsetzbarkeit von Expertenwissen des Ingenieurwesens für tragwerksplanerische Entwurfsaufgaben ermöglicht. Einer der Hauptgründe dafür ist die Eignung zur Simulation der menschlichen Fähigkeiten zur Problemlösung und Entscheidungsfindung, die auch im Falle hochkomplexer Sachverhalte bestehen bleibt (SCHNELLENBACH-HELD & STEINER 2017). Zusätzlich bieten Fuzzy Systeme eine hohe Stabilität, ein redundantes Verhalten sowie außerordentliche Generalisierungsfähigkeiten (STEINER & SCHNELLENBACH-HELD 2017). Fuzzy-Inferenz-Systeme basieren auf der Anwendung der Fuzzy-set-Theorie nach L.A. Zadeh. Diese basiert auf der Erweiterung der klassischen Mengenlehre durch die Verwendung von unscharfen („fuzzy“) Mengen. Dafür wird die mögliche Zugehörigkeit eines Elementes zu einer Menge vom booleschen 0 („falsch“) oder 1 („wahr“) erweitert auf eine kontinuierliche Zugehörigkeitsfunktion zwischen 0 („keine Zugehörigkeit“) und 1 („volle Zugehörigkeit“). Diese unscharfen Zugehörigkeitsübergänge sind die Basis für eine hohe Generalisierungsfähigkeit sowie für die Nachahmung des menschlichen Entscheidungsverhaltens und Verständnisses komplexer Sachverhalte. In Inferenzsystemen benutzte Parameter werden mit Fuzzymengen partitioniert, sodass Regeln zur Abbildung von Mengen der Eingabeparameter auf Mengen der Zielgrößen eingesetzt werden können. Eine partitionierte Fuzzyvariable wird oft als linguistische Variable bezeichnet, da den Fuzzymengen üblicherweise linguistische Werte wie „klein“ oder „hoch“ zugeordnet werden. Die funktionalen Mengenzuordnungen werden anschließend durch linguistische Regeln formuliert, die in ihrer Summe die Wissensbasis des Inferenzsystems bilden. Dafür wird die intuitive und leicht verständliche Form des Modus Ponens „Wenn (Prämisse), dann (Konklusion)“ verwendet: WENN Länge = „klein“ UND Last = „groß“ DANN Bewehrung = „mittel“. Dieser wurde im Rahmen der Fuzzy-Set-Theorie für die Verwendung mit unscharfen Mengen verallgemeinert, sodass ein approximatives Schließen der Konklusion aus der Prämisse erfolgt. Für die Anwendung von Fuzzy-Inferenz-Systemen werden in der Praxis zwei gängige Modelle eingesetzt: Das MA-Modell nach Mamdani und Assilian sowie das TSK-Modell nach Takagi, Sugeno und Kang. Das prinzipielle Vorgehen zur Evaluation eines Abbildungsergebnisses durch ein Fuzzy-System ist wie folgt:

- Fuzzyfikation (Zugehörigkeiten scharfer Eingabewerte zu Input-Fuzzymengen)
- Aggregation („UND“: Auswertung von Verknüpfungen innerhalb der Prämissen)
- Implikation („WENN, DANN“: Konklusion der Prämissen auf Output-Fuzzymengen)
- Akkumulation (Zusammenfassen der Konklusionen auf Output-Fuzzymengen)
- Defuzzifikation (Ermittlung der scharfen Ausgabewerte aus akkumulierter Menge)

Der wesentliche Unterschied der beiden Modelle ist dabei die Formulierung und Auswertung der Konklusion (Implikation, Akkumulation, Defuzzifikation) der Fuzzyregeln. Wäh-

rend das MA-Modell logische Operatoren für die funktionale Abbildung einer Regel enthält, werden beim TSK-Modell polynomische Funktionen eingesetzt, die im Allgemeinen zu einer höheren numerischen Genauigkeit bei Funktionsapproximationen führen (SCHNELLENBACH-HELD et al. 2014) bzw. (SCHNELLENBACH-HELD & STEINER 2014).

3.2 Generierung der unscharfen Wissensbanken

Wesentlicher Inhalt der detaillierungsgrad-abhängigen unscharfen Wissensbanken ist die Evaluation der Possibilität enthaltener Konstruktionsarten sowie des Vorentwurfs der entsprechenden Tragwerkslösungen. Diese Datengrundlage erfordert die Bestimmung des vollständigen möglichen Parameterraums sowie enthaltener funktionaler Abhängigkeiten, die als Abbildungsregeln formuliert werden können. Dafür werden Parameterstudien durchgeführt, die den tragwerksplanerischen Entwurf typischer tragender Bauteile bzw. der idealisierten Positionen der Tragelemente beinhalten (ALoD 2a). Die Studien umfassen die Bemessung und die Nachweise entsprechend der gültigen Norm (Eurocode) für die Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit (GZT, GZG). Dabei werden grobe und einfache Regeln des Ingenieurwissens zur Ermittlung angemessener Parameterbegrenzungen eingesetzt, beispielsweise wird die Betonfestigkeitsklasse C12 aufgrund der indikativen Mindestfestigkeit ignoriert und Flachdecken weisen eine Deckenstärke von mindestens 20 cm auf. In den grundlegenden Studien werden zunächst alle Entwurfparameter berücksichtigt, die zur Berechnung und Bemessung eines Tragelementes notwendig sind. Anschließend werden auf Basis einer inkrementellen Abtastung in den adäquaten Intervallen der Eingabeparameter sowohl die Bemessung und Konstruktion der Elementlösungen als auch deren Realisierbarkeit ermittelt. Entsprechend der eingeführten Possibilität (ALoD 2b) wird dabei eine Lösung mit einem Wert von 0,5 als „möglich“ klassifiziert, sobald alle Grenzzustände eingehalten werden können. Anderenfalls erfolgt eine Bewertung mit 0,0 als „nicht realisierbar“. Durch die Bemessung der Tragelemente werden zusätzlich die einsetzbaren Kombinationen der Entwurfsgrößen zur Elementdimensionierung in die Datenbasis integriert. Dazu zählen für einen bestimmten Querschnitt unter vorgegebenen Randbedingungen insbesondere die Materialgüte mit notwendiger Bewehrungsmenge (ALoD 3).

Der tragwerksplanerische Bauteilentwurf für den inkrementell abgetasteten Parameterraum führt zu einem Mapping, das zum Schließen der Entwurfsgrößen aus den strukturellen Randbedingungen geeignet ist. Dabei stellt jede enthaltene Lösung eine Stützstelle der gesuchten hochauflösenden Abbildungsfunktionen für die Possibilität und den Vorentwurf der Bauteile dar. Durch Berücksichtigung der unscharfen Mengenzuordnungen können die Parameter des Entwurfsraumes anschließend mit Fuzzymengen partitioniert werden. Diese können ebenfalls als Stützstellen der Funktion interpretiert werden, jedoch ist dabei eine wesentlich geringere Anzahl erforderlich und somit eine schnellere Evaluation möglich. Die zugehörigen Regeln werden entsprechend der inkrementell approximierten Abbildungsfunktionen aufgestellt. Die resultierenden Inferenz-Systeme aus Fuzzy-Variablen und zugehörigen Regelbasen bilden schließlich die unscharfen Wissensbanken der Ersatzmodelle für die Tragwerksplanung.

3.3 Komplementierung der Inferenzsysteme zur Bildung der Ersatzmodelle

Die entwickelten Wissensbanken sind in der Lage, für gegebene Randbedingungen die Realisierbarkeit sowie den Vorentwurf aller enthaltenen Tragwerkslösungen zu ermitteln.

Dabei entsteht eine Vielzahl möglicher Konstruktionen, zu deren Reduktion eine Bewertung der in den Wissensbanken enthaltenen Lösungen erforderlich ist. Zur Identifikation einer einzusetzenden Konstruktion werden Optimierungen durchgeführt, die auf Basis eines Vergleichs der möglichen Entwürfe eine optimale Lösung ermitteln. Das Ergebnis dieses Vorgehens zur Qualifikation von Entwürfen entspricht der Auswahl eines möglichen geeigneten Tragsystems und somit der Entscheidungsfindung im tragwerksplanerischen Vorentwurf. Die dabei ermittelten Abbildungsvorgänge werden anschließend in die Regelbasen der Inferenz-Systeme integriert.

Zur Bewertung der einzelnen Lösungen werden Kostenfunktionen entwickelt und eingesetzt, die eine einheitliche Ermittlung des Realisierungsaufwandes für die Tragsysteme und damit deren Vergleich ermöglichen. Das Optimierungsverfahren verkörpert die anschließende Suche nach dem System je Konstruktionstyp (ALoD 3), das unter gegebenen Randbedingungen (ALoD 2a) möglich und mit minimalem Aufwand realisierbar ist. Den dabei ermittelten Optima wird eine Possibilität von 1,0 (ALoD 2b) zugeordnet, sodass eine regelbasierte Abbildung der Optimierungsergebnisse für den Vergleich der Konstruktionstypen ermöglicht wird. Durch diese Komplementierung der Regelbasen wird zunächst die Evaluation einer eindeutigen Vorbemessung aus den möglichen Konstruktionen je Typ realisiert. Das daraus resultierende Inferenzsystem ist das Ersatzmodell für den tragwerksplanerischen Vorentwurf, welches die notwendigen Entwurfsgrößen für den Transfer von ALoD 2b zu ALoD 3 ermittelt. Durch die Erweiterung der Regelbasis mit den Zuordnungen der zusätzlichen Possibilität wird die Entscheidung für einen optimalen Konstruktionstyp über den Vergleich der Possibilitäten implementiert. Die komplementierte Inferenz ist schließlich das Ersatzmodell, das die Possibilitätswerte für den Transfer von ALoD 2a zu ALoD 2b ermittelt. Die komplementären Abbildungsvorgänge aus den Optimierungen repräsentieren ein Mapping des Parameterraums, das eine Wissensgenerierung für niedrigere Detaillierungsstufen ermöglicht. Die zugehörigen Regeln erlauben schließlich die Zuordnung der einsetzbaren „optimalen“ Lösungen zu den weniger umfangreichen Randbedingungen.

4 Zusammenfassung

Die Berücksichtigung der tragwerksplanerischen Perspektive in frühen Entwurfsphasen ermöglicht eine erfolgreiche Planung von Gebäuden. Zur Integration einer entsprechenden Entscheidungsunterstützung in den Entwurfsprozess werden detaillierungsgradabhängiges Expertenwissen des Ingenieurwesens sowie zugehörige intelligente Ersatzmodelle eingesetzt. Dabei ermöglicht die Verwendung von Methoden der Fuzzy Logic eine Formulierung von Abbildungsinferenzen mit Expertenregeln. Diese Inferenzsysteme basieren auf unscharfen Wissensbanken sowie zugehörigen Abbildungsregeln für die Tragwerksplanung. Dafür wird eine Wissensgenerierung durchgeführt, die ausführliche Parameterstudien zur Berechnung und Bemessung von üblichen Tragelementen umfasst. Zur Qualifikation der enthaltenen Lösungen und somit zur Vervollständigung des tragwerksplanerischen Entscheidungsprozesses werden Optimierungen durchgeführt. Anschließend wird die Wissensbasis mit dabei ermittelten Abbildungsvorgängen komplementiert. Die resultierenden Inferenzsysteme sind schließlich die Ersatzmodelle, die eine Integration der Tragwerksplanung in frühe Planungsphasen zulassen. Eine derartige Unterstützung der Vorentwurfsplanung ermöglicht schließlich eine Harmonisierung und Effizienzsteigerung des Entwurfsprozesses.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Kontext des Forschungsprojektes „Intelligente Ersatzmodelle in der Tragwerksplanung“. Dieses wird von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) im Rahmen der Forschergruppe 2363 „Bewertung von Gebäudeentwurfsvarianten in frühen Entwurfsphasen auf Basis adaptiver Detaillierungsstrategien“ unterstützt. Für die Unterstützung danken wir der DFG herzlich.

Literatur

- EL-DIRABY, T., KRIJEN, T. & PAPAGELIS, M. (2017), BIM-based collaborative design and socio-technical analysis of green buildings. In: *Automation in Construction*, 82, 59-74.
- KIM, J.I., KIM, J., FISCHER, M. & ORR, R. (2015), BIM-based decision-support method for master planning of sustainable large-scale developments. In: *Automation in Construction*, 58, 95-108.
- LIU, H., ONG, Y.S. & CAI, J. (2018), A survey of adaptive sampling for global metamodeling in support of simulation-based complex engineering design. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57, 393-416.
- MAIER, J.F., ECKERT, C.M. & CLAKSON, P.J. (2017), Model granularity in engineering design – concepts and framework. In: *Design Science*, Volume 3, Cambridge.
- SCHNELLENBACH-HELD, M. & ALBERT, A. (2003), Computergestütztes Entwerfen im Stahlbetonhochbau mit wissensbasierten Systemen und Fuzzy Logic. In: *Bauingenieur*, 78, 517-524.
- SCHNELLENBACH-HELD, M. & HARTMANN, M. (2003), Using Knowledge Based Systems for Building Design in Computer Supported Cooperative Work. In: *Darmstadt Concrete*, V18, Darmstadt.
- SCHNELLENBACH-HELD, M., HARTMANN, M. & PULLMANN, T. (2006), Knowledge Based Modeling in Network Cooperative Building Design using Elements of Fuzzy Logic. In: *Proceedings of the XIth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Montreal.
- SCHNELLENBACH-HELD, M. & STEINER, D. (2014), Self-Tuning Closed-Loop Fuzzy Logic Control Algorithm for Adaptive Prestressed Structures. In: *Structural Engineering International*, 24(2), 163-172.
- SCHNELLENBACH-HELD, M., STEINER, D., FAKHOURI, A. & KÜHN, O. (2014), Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem. In: *Bauingenieur*, 89, 57-66.
- SCHNELLENBACH-HELD, M. & STEINER, D. (2017), Adaptive Prestressed Structures Realized by Utilization of Artificial Intelligence Techniques. In: *Report of the 39th IABSE Symposium: Engineering the Future*, Vancouver.
- STEINER, D. & SCHNELLENBACH-HELD, M. (2017), Realization of Adaptive Prestressing. In: VAN SCHEVEN, M., KEIP, M.A. & KARAJAN, N. (Hrsg.): *Proceedings of the 7th GACM Colloquium on Computational Mechanics for Young Scientists from Academia and Industry*, Stuttgart.
- ZHANG, J., LI, H., ZHAO, Y. & REN, G. (2018), An ontology-based approach supporting holistic structural design with the consideration of safety, environmental impact and cost. In: *Advances in Engineering Software*, 115, 26-39.

Semantic modeling of wastewater treatment plants towards international data format standards

Carla Di Biccari¹ and Dominik Heigener²

¹ CoreLab · University of Salento · Campus Ecotekne · 73100 Lecce · Italy

Email: carla.dibiccari@unisalento.it

² Chair of Computing in Civil Engineering · Bauhaus University Weimar · Coudraystr. 7 ·

99423 Weimar · Germany

Email: dominik.heigener@uni-weimar.de

Building information modeling (BIM) is a methodology for managing structures by digitally sharing information related to all phases of the structural lifecycle. BIM requires standardized data formats for information exchange, such as the Industry Foundation Classes (IFC), which are the only open standardized data format used for BIM. However, currently BIM cannot be applied for managing water infrastructure, as water infrastructure is not covered by IFC. Thus, the IFC schema needs to be extended to support water infrastructure. In this paper, a basis for the IFC extension is presented, following two steps, (i) identification of reliable knowledge sources, such as software packages and standards and (ii) semantic modeling. In addition, a case study on an Italian wastewater treatment plant (WWTP) is presented. For illustrative purposes, the WWTP is expanded following Italian and, hypothetically, German legal and technical regulations, to be reflected in the semantic model and in the IFC extension. A comparison between Italian and German regulations reveals that both countries require similar design procedures, which can formally be described on a common superset of parameters. In conclusion, the semantic model proposed in this study can serve as basis for extending the IFC schema for describing water infrastructure.

Keywords: Building information modeling (BIM), Industry Foundation Classes (IFC), information modeling, metamodeling, semantic modeling, wastewater treatment plants

1 Introduction

Building information modeling (BIM) has become increasingly important on a European level since single member states have been introducing BIM in their legislation, requiring BIM in construction works due to the European Union Public Procurement Directive. The Italian Ministerial Decree n.560/2017 demands all public contracting authorities to use “digital instruments and processes” for infrastructure management and for building modeling in public procurement procedures (MIT 2017). In Germany, the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure requires BIM to be used in all publicly financed infrastructure projects by the year 2020 (BMVI 2017).

Besides legislative demands, the employment of BIM is also driven by practical reasons. Given the complex nature of water infrastructure (BENEDETTI 2006), the use of standards is essential for a fully integrated management and for reaching efficient levels of interoperability and communication (LAAKSO & KIVINIEMI 2012, EDMONSON et al. 2018). For example, “open BIM” is a universal approach to collaborative design, realization, and operation of buildings based on standardized data formats. Open BIM provides a common language allowing project members to participate regardless of software packages

(KIVINIEMI 2015). The Industry Foundation Classes (IFC), which are described by the IFC schema, represent the only open standardized data format for BIM.

The need for specialized extensions of the IFC standard has been highlighted in several infrastructural domains resulting in the development of IFC-Alignment, IFC-Bridge and IFC-Road/IFC-Rail (BUILDINGSMART 2018). Also, specialized extensions have been proposed for describing sensor-based structural health monitoring systems (THEILER & SMARSLY 2018). To extend the IFC schema for modeling domains without IFC-dedicated objects, proxy elements and property sets have been employed, representing a quick solution towards extending the IFC (WEISE et al. 2009). However, the same authors have indicated that using proxy elements and property sets leads to a loss of semantic information.

The need for an IFC extension supporting water infrastructure has been illustrated by SÖBKE et al. (2018) and EDMONSON et al. (2018). IFC extensions have to be applicable worldwide. Therefore, this paper exemplarily analyzes the requirements for water infrastructure in two EU countries (Italy and Germany) to define a common semantic model, which can serve as basis for the IFC extension. The production of this semantic model is intended to be viewed as a “*prototyping*” activity, i.e. a combination of explicit knowledge as in the Socialization, Externalization, Combination, Internalization SECI model proposed by NONAKA & KONNO (1998), where the knowledge sources to be considered are tangible, codified documents. The knowledge sources considered in this work are documents with normative (and similar) value, such as standards or software packages.

Defining business requirements is the first step of the IFC development cycle (LIEBICH 1999, WEISE 2009), the IFC schema being an object-oriented tool for requirements representation. This work therefore utilizes methodologies for requirements elicitation well established in the field of object-oriented system development (JACOBSON 1992, SOMMERVILLE 2017, BRUEGGE & DUTOIT 1999). In the second step, the semantic model is defined to be implemented as IFC schema extension. Accordingly, in the second section of this paper, the legal knowledge sources for dimensioning wastewater treatment plants available in Italy and in Germany are analyzed summarizing the parameters needed for the preliminary design level. In the third section, the preliminary design of the wastewater treatment plant (WWTP) located in Maglie, Italy, is presented as case study. The fourth section proposes a semantic model of the WWTP describing the preliminary design of the WWTP based on the knowledge sources studied in the second section. The paper ends with a summary and conclusions.

2 Knowledge sources for WWTP design

This section summarizes the knowledge sources used for developing the semantic model. First, the knowledge sources from Italy are given, followed by the knowledge sources from Germany.

2.1 Italy

The main Italian legislative reference for wastewater treatment plants is the Legislative Decree April 3, 2006, n°152 (TUA 2006), *Norme in Materia Ambientale. Testo Unico Ambientale* (TUA) and its updates, better known as *The Environmental Code*. The Environmental Code defines values of a set of parameters to be met by the effluent of the plant (Table 1). Moreover, the Italian legislation confers territorial planning activities guiding

the full lifecycle of water infrastructure on local authorities. Local planning instruments define the influent load to a WWTP in terms of Population Equivalent (P.E.) of a given area. The construction, management and maintenance of the works is entrusted to a specific local “Managing Body”, i.e. a local governmental authority. The design documentation is organized in three levels according to the Public Procurement regulation: preliminary, detailed and executive. The TUA (2006) identifies four plant capacity classes, expressed in terms of P.E. (Table 2). In addition to the national legislation, each Italian region has its own set of regulations regarding effluent parameters and guidelines for the design of wastewater treatment plants. In this paper, the regulation in force in Italy’s Apulia region is analyzed.

Table 1: Effluent limitations (Included (o) and not included (-) in the regulation; sources: Italy: Table 1 and Table 2 of TUA (2006), Germany: ABwV (2017))

Parameters (daily average)	Unit	ITA	GER
BOD5 (no nitrification)	mg/L	o	o
COD	mg/L	o	o
Suspended solids	mg/L	o	-
N-NH ₄	mg/L	-	o
Total phosphorus	mg/L	o	o
Total nitrogen	mg/L	o	o

Table 2: Categorization of wastewater treatment plants according to the capacity (unit of size ranges: 1000 P.E, German figures derived from average BOD5 load per P.E.) (Sources: Italy: TUA (2006), Germany: ABwV (2017))

Categorization	1	2	3	4	5
ITA (“Type”)	< 2	2 - 10	10 – 50	> 50	-
GER (“Size categories”)	< 1	1 - 5	5 – 10	10 - 100	> 100

2.2 Germany

The legal basis for planning wastewater treatment plants in Germany is the *Abwasserverordnung* (AbwV) (ABwV 2017). AbwV is a regulation on national level and contributes to dimensioning of wastewater treatment plants by defining size categories and requirements regarding the effluent. Size categories are defined depending on WWTP capacity measured in P.E. Further regional regulations may tighten, but not loosen the requirements for the effluent. AbwV does not regulate specific treatment procedures; instead, it is stated that treatment has to be performed according to “generally recognized rules of technology”. The German Association for Water, Wastewater and Waste (DWA) is one of the authoritative organizations that define generally recognized rules of technology. The DWA is in charge of specifying standards for sustainable water infrastructure, such as the “A 131 – Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants” (ATV-DVWK 2003).

3 Case study of a wastewater treatment plant in Maglie, Italy

This section focuses on the preliminary design of the WWTP located in Maglie, a town in Apulia, Italy, currently serving around 70.000 P.E. First, the dimensioning procedure according to the Italian and Apulian regulation is presented. The preliminary design document produced by the competent regional Managing Body, i.e., “*Acquedotto Pugliese*” (AQP), is referenced as knowledge source, being a public document with legal validity. Secondly, the preliminary design of the Maglie WWTP according to the German regulations is carried out, using the software package *Active Sludge Expert* (FRÖSE 2012) as knowledge source. The WWTP located in Maglie performs an oxidative treatment process with activated sludge and anaerobic digestion. The plant is currently undergoing a process of expansion from 73.630 P.E. to 110.263 P.E.

3.1 Introduction to the regional Apulian regulation

Urban wastewater treatment plants are subject to a specific local regulation in the Apulia region, the R.R. n.13, May 2017 (PUGLIA 2017). This regulation defines the content of the design documentation and explicitly mentions the application of BIM to the development of new plant projects (PUGLIA 2017). Art.B3 of Annex B of PUGLIA 2017 contains general guidelines for dimensioning, which are applicable to new plants as well as to activities related to expanding, refurbishment, process improvement, and layout modification of existing plants. The parameters used for dimensioning are person load, influent flow (design value), daily average dry weather flow, influent load, average daily flow, average daily volume, and plant capacity (PUGLIA 2017).

3.2 Preliminary dimensioning of the WWTP Maglie in the documentation of the Managing Body

Table 3 lists the design parameters identified by the preliminary design document determined by AQP (AQP 2015). The document outlines the status of the plant, its layout and the modifications needed to meet national and regional regulations for the new technical capacity of the WWTP. Design simulations have been performed with *ASCAM* (Activated Sludge Computer Aided Modelling) (TOMEI & RAMADORI 2002), a software package for dimensioning activated sludge wastewater treatment plants applying dynamic models. Further, the parameters describing the pollutant load in the wastewater have been specified in the preliminary design document (Table 3).

3.3 Preliminary dimensioning according to German regulations

The software *Active Sludge Expert* implements the steady-state model described in the DWA standard A 131. Table 1 lists the parameters required for the preliminary design level of the WWTP expansion and the parameters available in the official preliminary design document for the WWTP Maglie. The software allows manually selecting the basic components of the plant, and then it requires the parameters for calculating both hydraulic and polluting loads of the influent. Most parameters requested by the preliminary design document are available, except total nitrogen (N_{tot}). The parameters chemical oxygen demand (COD), COD dissolved, NO₃ and alkalinity are not directly requested by the regional regulation but can be derived from other parameters.

3.4 Comparison between the Italian and the German regulations

Both regulations indicate minimum effluent requirements for different capacity classes (size categories). However, the Italian regulations expresses these requirements in terms of P.E., while the German legislation adds a definition in terms of 5 days biochemical oxygen demand (BOD5) load. There are few differences between both regulations in terms of parameters for the effluent characterization. The German regulations adds the parameter alkalinity, the peak factor for carbon respiration and the peak factor for ammonium oxidation. No specific methodology for the preliminary design is indicated by the Italian regulations or by comparable knowledge sources. Nevertheless, the preliminary design document references the use of software for dynamic modeling and lists the kinetic parameters needed for this modeling along with values to be adopted.

Table 3: Parameters for influent and effluent characterization (Included (o) and not included (-) in the regulation; sources: Italy: AQP (2015), PUGLIA (2017), Germany: FRÖSE (2012))

Parameter Group	Parameters	Unit	ITA	GER
Influent: Hydraulic load	Person load	P.E.	o	-
	Water supply	l/P.E./d	o	-
	φ return flow rate		o	o
	Average influent daily volume	mc/d	o	o
	Daily average dry weather flow	mc/d	o	o
	Two-hour-top dry weather flow	mc/d	-	o
	Average flow after equalization	mc/h	o	-
	Design inflow at the screening			
	Peak flow after the first pumping station			
Influent: Pollutant load	Temperature	C°	o	o
	BOD	kg/d	o	o
	COD	kg/d	o	o
	Dissolved COD	kg/d	-	o
	TSS	kg/d	o	o
	N-NH ₄ ⁺	kg/d	o	o
	TKN	kg/d	o	o
	Phosphorus	kg/d	o	o
Effluent: Pollutant load	Alkalinity	mmol/l	-	o
	BOD5	mg/l	o	o
	COD	mg/l	o	o
	TKN	mg/l	o	o
	TSS	mg/l	o	o
	Ammonia nitrogen	mg/l	o	o
	Phosphorus	mg/l	o	o
	E. Coli (colony-forming units per 100 milliliters of water)		o	-

The main difference observed from the comparison is between the design models suggested by the knowledge sources of the two countries. The regulation adopted in Germany proposes a steady model and software for implementing it, while in Italian practice using dynamic models is widespread.

4 A semantic model for wastewater treatment plants

In the preliminary design, a draft layout of a WWTP must be assembled according to both the Italian and the German regulations as a first hypothesis of the chain of treatments expected to be performed by the WWTP. Both regulations require a set of parameters describing the quality of the influent and define a set of values to be met by the parameters describing the effluent of the WWTP. At this level of design, values characterizing the flow are also given for different sections of the WWTP (e.g., inlet flow of the anaerobic mixing tank, inlet flow of the secondary clarifier). Taking into account the aforementioned definitions, the semantic model illustrated in the UML diagram of Figure 1 is proposed.

The model in Figure 1 shows the superclass `WastewaterTreatmentPlant` which has a set of `AbstractWWTComponent`. The set of components varies depending on the specific layout of the WWTP. The regulations examined in this papers determine the characterization of the influent of the first component and the effluent from the last component. To this end, stereotyped anonymous subclasses `FirstComponent` and `LastComponent` are given. The regulations give few other parameters related to middle components, such as the secondary clarifier, represented in the model as the subclass `SecondaryClarifierComponent`. The `FirstComponent` has a `PSetInfluentLoad` class with all the attributes requested by the regulations to characterize the influent. Similarly, the `LastComponent` has a `PSetEffluentRequirementClass` and the `SecondaryClarifierComponent` a `PSetInfluentRequirements`.

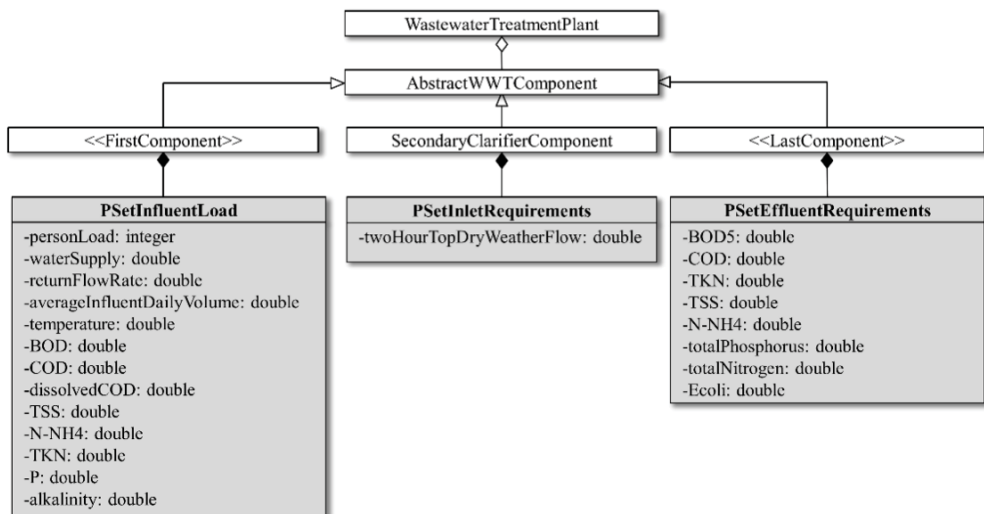


Figure 1: UML diagram of classes needed at preliminary design level to model a WWTP

5 Summary and conclusions

The lack of standardized data formats for water infrastructure has been hindering the applicability of open BIM approaches to water infrastructure. IFC is the only open international standardized data format for applying BIM. However, the IFC standard has limited applicability. To provide an IFC extension for water infrastructure, the requirements from different national regulations have to be considered, due to the international character of the standard. In this paper, a semantic model for water infrastructure has been developed to serve as a basis for IFC extension. Exemplarily, the legislations for constructing wastewater treatment plants in Italy and in Germany have been compared to serve as reliable knowledge sources towards IFC extension. Requirements from the regulations for the characterization of influent and effluent have been determined using an Italian document implementing preliminary WWTP design and a German software package for WWTP design; both have been semantically merged and transformed into a semantic model. The comparison between the regulations from the two countries has yielded differences in the design processes. However, it was possible to identify supersets of the parameters relevant to WWTP design. For the definition of an IFC extension, it is concluded that IFC property sets have to be filled selectively with parameter values in accordance with the national design process.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the financial support of the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) received through the “ILMA” project under grant number FKZ 01IS17007C. Any opinions, findings, conclusions, or recommendations expressed in this paper are those of the authors and do not necessarily reflect the views of BMBF.

Literature

- AQP (2015), Preliminary Design of the extension of the WWTP serving the town of Maglie. [Progetto Preliminare del Potenziamento dell'Impianto di Depurazione a Servizio dell'Agglomerato di Maglie].
www.aqp.it/portal/pls/portal/docs/1/1303289.PDF (27.05.2018).
- ABwV (2017), Wastewater Decree [Abwasserverordnung - AbwV].
www.gesetze-im-internet.de/abwv/ (31.05.2018).
- BENEDETTI, L. (2006), Probabilistic design and upgrade of wastewater treatment plants in the EU Water Framework Directive context. PhD thesis, Ghent University, Belgium, pp. 304.
- BMVI (2017), Strategy paper digital sovereignty: Taking innovation leadership in digital planning and building, Building Master Plan 4.0. [Strategiepapier Digitale Souveränität: Innovationsführerschaft beim digitalen Planen und Bauen übernehmen].
www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/strategiepapier-masterplan-bauen.pdf?__blob=publicationFile (17.05.2018).
- BRUEGGE, B. & DUTOIT, H. A. (1999), Object-Oriented Software Engineering Conquering Complex and Changing Systems. Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall PTR.

- BUILDINGSMART (2018a), Standards Process.
www.buildingsmart.org/standards/standards-process/#charters (28.05.2018).
- BUILDINGSMART (2018b), Infrastructure Room. buildingSMART
www.buildingsmart.org/standards/rooms-and-groups/infrastructure-room/ (19.05.2018).
- DWA (2000), STANDARD ATV-DVWK-A 131E Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants. Hennef, Germany.
- FRÖSE, G. (2012), Activated Sludge Expert – Software for Standard ATV-DVWK-A 131E Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants – Edition 2.0.2 / 2012, DWA.
www.dwa.de/esearchdwaschop/Search?index=all&volltext=131e (17.10.2017).
- EDMONSON, V., CERNY, M., LIM, M., GLEDSON, B., LOCKLEY, S. & WOODWARD, J. (2018), A smart sewer asset information model to enable an ‘Internet of Things’ for operational wastewater management. *Automation in Construction*, 91 (July 2018), 193-205.
- KIVINIEMI, A. (2015), The True Meaning of Open BIM? www.bimrec.com/wp-content/uploads/2015/11/BIM-REC-Webinar-17.0-Discover-The-True-Meaning-of-Open-BIM-with-Prof-Arto-Kiviniemi.pdf (17.05.2018).
- LAAKSO, M. & KIVINIEMI, A. (2012), The IFC Standard - A Review of History, Development, and Standardization. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*. 17, 134-159.
- LIEBICH, T. W. (1999), Highlights of the development process of industry foundation classes. In: *Proceedings of the 1999 CIB W78 Conference*, Vancouver, May 31–June 3, 1999.
- MIT, (2017), Ministerial Decree. N. 560 01/12/2017 [Decreto Ministeriale].
- NONAKA, I. & KONNO N. (1998), The Concept of “Ba”. Building a foundation for knowledge creation. *California Management Review*. 40 (3), 40-54.
- PUGLIA, R. (2017), Regional Regulation. n.13 22/05/2017. Provisions for collecting systems and treatment plants for urban wastewater and its discharge. [Disposizioni in materia di reti di fognatura, di impianti di depurazione delle acque reflue urbane e dei loro scarichi a servizio degli agglomerati urbani.].
- SCHENK, D. A. & WILSON, P. R. (1994), *Information Modeling: The EXPRESS Way*. Oxford, England, Oxford University Press.
- SÖBKE, H., THEILER, M., TAUSCHER, E. & SMARSLY, K. (2018), BIM-based description of wastewater treatment plants. In: *Proceedings of the ICCBE 2018 - 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Tampere, Finland, June 5.
- SOMMERVILLE, I. (2017), *Software Engineering*. Harlow, Essex, England, Pearson Education Ltd.
- SOMMERVILLE, I. & VILLER, S. (2000), Ethnographically informed analysis for software engineers. *International Journal of Human-Computer Studies*. 53 (1), 169-196.
- THEILER, M. & SMARSLY, K. (2018), IFC Monitor – An IFC extension for modeling structural health monitoring systems. *Advanced Engineering Informatics*, 37 (August 2018), 54-65.
- TOMEI, M. C. & RAMADORI, R. (2002), *ASCAM: Activated sludge computer aided modelling: teoria e manuale d'uso del software*. Rome, Italy, Istituto di ricerca sulle acque.
- TUA. (2006), Legislative Decree. n.152 03/04/2001. Unified Environmental Code. [Decreto Legislativo. Norme in Materia Ambientale - Testo Unico dell'Ambiente].
www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2006/04/14/88/so/96/sg/pdf (17.05.2018).
- WEISE, M., LIEBICH, T. & WIX, J. (2009), Integrating use case definitions for IFC developments. In: *Proceedings of ECPPM 2008 - eWork and eBusiness in Architecture and Construction*, Sophia Antipolis, France, September 10-12, 637-645.

SolConPro: Verteilte Produktdatenkataloge mit automatisierter Datenverarbeitung

Anna Wagner, Laura Kristina Möller und Christian Leifgen

Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen · Technische Universität Darmstadt

Franziska-Braun-Str. 7 · 64287 Darmstadt ·

E-Mail: {wagner, moeller, leifgen}@iib.tu-darmstadt.de

Um die Integration multifunktionaler Fassadenkomponenten in Bauprozesse zu erleichtern, müssen von diesen umfassende, digitale Produktbeschreibungen vorliegen. Durch ihre Multifunktionalität variieren die notwendigen Informationsmengen nach Anwendungsfall. Dies verursacht Unsicherheiten bei Herstellern, welche Informationen wofür bereitgestellt werden müssen. Zudem existieren keine geeigneten Plattformen zur Verbreitung solcher Produkte, sodass der Produktdatenaustausch durch bitlaterale Kommunikation geschieht.

In diesem Beitrag wird ein verteilter Produktdatenkatalog vorgestellt, der Hersteller-Produktdatenbanken anbinden kann. Durch Anwendung von Linked-Data-Methoden vermeidet dieser redundante Daten. Um Fachplaner bei Informationsextraktionen zu unterstützen, wird ein Ansatz zur automatisierten Datenverarbeitung mithilfe modularer, wiederverwendbarer Komponenten präsentiert. Kombiniert mit verteilten Produktdatenkatalogen können so Produktdatenverbreitung und -einbindung erleichtert werden.

Keywords: Produktdatenkatalog, Linked Data, Datenverarbeitung

1 Einleitung

Als Teil der Gebäudehülle können Fassaden nicht nur das Erscheinungsbild des Gebäudes beeinflussen oder dieses vor Witterungseinflüssen schützen. Durch die Anwendung neuer Technologien können sie zudem Gebäudesysteme wie Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik unterstützen oder als energetisch aktive Fassadenkomponenten (englisch: *energetically active façade components* - EAFC) zur aktiven Solarenergiewandlung dienen. Mithilfe dieser Komponenten ist es möglich, die meist ungenutzten vertikalen Flächen in Stadtgebieten in Konversionsflächen umzuwandeln.

Die Verwendung von EAFC ist, wie der Einsatz multifunktionaler Bauteile im Allgemeinen, durch ihre Multifunktionalität für verschiedene im Projekt beteiligten Fachplaner sehr vielschichtig. Besonders im Hinblick auf die Verfügbarkeit, den Umfang und den Austausch von Informationen über diese Produkte stellen die einzelnen Fachplaner – auch abhängig vom Projektfortschritt – unterschiedlichste Anforderungen. Überdies liegen digitale Beschreibungen der Produkte nicht zentral an einem für alle Beteiligten zugänglichen Ort oder nicht in dem für die Fachplaner erforderlichen Dateiformat vor. Dies erschwert den Datenaustausch untereinander, erhöht den Kommunikationsaufwand zwischen den Beteiligten und führt dadurch auch zu einem Hemmnis des Einsatzes multifunktionaler Bauteile.

Das Forschungsprojekt *Solar Construction Processes* (SolConPro, (SOLCONPRO 2018)) befasst sich mit der ganzheitlichen Integration von energetisch aktiven Fassadenkomponenten in Bauprozesse über den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken. Neben einer umfas-

senden Beschreibung der Produktinformationen wird auch die Bereitstellung sowie die Aufbereitung dieser Informationen im Sinne der Methodik des *Building Information Modelling* (BIM) adressiert. Dieser Beitrag stellt das im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte Konzept eines verteilten Produktdatenkatalogs und einer Plattform zur automatisierten Verarbeitung der verfügbaren Projekt- und Produktdaten vor.

2 Hintergrund

Die im Beitrag vorgestellte Herangehensweise schließt zum einen die Bereitstellung von Produktbeschreibungen im Rahmen eines Produktdatenkatalogs und zum anderen die anwendungsfallspezifische Aufarbeitung bzw. Verarbeitung der vorliegenden Daten ein. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über bereits vorhandene Methoden und Forschungsergebnisse in diesen Bereichen aufgeführt.

Die verfügbaren Kataloge zur Beschreibung von Produkten lassen sich in Produkt- und Objektkataloge unterteilen. Produktkataloge konzentrieren sich auf herstellerbezogene Produktinformationen, bieten detaillierte Produktbeschreibungen und ermöglichen eine gezielte Produktsuche. Während in Produktkatalogen die Verfügbarkeit der Informationen von Datenblättern im PDF-Format bis hin zu einzelnen BIM-Objekten variieren, enthalten Objektkataloge Produkte, die in mindestens einer BIM-Objekt-Serialisierung (z. B. als Revit Family, IFC o. ä.) beschrieben sind (siehe z. B. (RIBA 2018)). Die Serialisierung der Daten ist nicht auf ein bestimmtes Format beschränkt, sodass weitere Informationen über das Produkt auch in zusätzlichen Formaten, wie bspw. Datenblätter im PDF-Format verfügbar sein können. Die hinterlegten Informationen sind jedoch aktuell nicht miteinander verbunden und beinhalten dadurch teils redundante Daten. Ein weiterer, sich aus der Verwendung unterschiedlicher Beschreibungsformate ergebender Nachteil ist eine Erschwernis von gezielten Produktsuchen. Auch hinsichtlich der Auswahl verfügbarer Produkte unterscheiden sich die Katalogtypen: Während Produktkataloge in der Regel von den Herstellern zur Verfügung gestellt werden und nur die von ihnen gelieferten Produkte enthalten, weisen Objektkataloge eine breite Auswahl von Produkten unterschiedlicher Hersteller auf. Sie können auch herstellerunabhängige Objekte enthalten, die in BIM-Modellen als Platzhalter eingesetzt werden können. Um die Vorteile beider Katalogarten zu nutzen und deren Nachteile zu vermeiden, wird in diesem Beitrag eine Kombination beider Typen angestrebt. Dies macht unter anderem den Einsatz von Vorverarbeitungsmethoden zur Umwandlung von Produktbeschreibungen in BIM-Objekte und zur Datenfilterung erforderlich.

Die über ein Produkt verfügbaren Informationen (insb. in BIM-Modellen) sollten abhängig von den Anforderungen des Anwenders resp. des Fachplaners abrufbar sein. Zur Definition der Anforderungen zum Datenaustausch und Filterung relevanter Daten existieren Herangehensweisen wie bspw. die *Information Delivery Manual* und *Model View Definition* Methoden (IDM / MVD (BUILDINGSMART INTERNATIONAL LTD. 2018a, 2018b)) oder BimSPARQL (ZHANG, BEETZ & DE VRIES 2017). Diese wurden jedoch für jeweils ein einzelnes Datenformat entwickelt. Dies führt dazu, dass Nutzer beim Kombinieren verschiedener Formate innerhalb eines Filterprozesses auf Probleme stoßen. Der im Beitrag vorgestellte Lösungsansatz besteht darin, eine Herangehensweise zu entwickeln, die es ermöglicht verschiedene Filtermethoden kombinieren zu können.

Neben den für die Datenbereitstellung und den Datenaustausch vorgestellten Entwicklungen, ist auch die Herausforderung der internationalen Zusammenarbeit zu nennen. Dies birgt Schwierigkeiten bei der Kommunikation, da kein einheitliches Vokabular existiert. Als einen Lösungsansatz hierfür wurde von buildingSMART das *buildingSMART Data Dictionary* (bSDD) vorgestellt (BUILDINGSMART INTERNATIONAL LTD 2018c).

3 Gesamtkonzept

Zur Unterstützung des Datenaustausches wurde im Rahmen des Forschungsprojektes SolConPro eine Plattform konzipiert, die sowohl die Datenbereitstellung, -verarbeitung als auch -aufbereitung ermöglicht. Die Plattform soll einerseits von Produktherstellern als Produktdatenkatalog verwendet werden können und andererseits Anwendern als Datenquelle mit auf die individuellen Anforderungen angepassten Datenverarbeitungsmechanismen dienen.

Über die Plattform können sowohl auf Projekt- als auch auf Produktebene Datenquellen eingebunden werden. Projektdaten werden über eine Verbindung mit einem BIMserver (BIMSERVER 2018) eingebunden. Auf Produktebene dient ein verteilter Produktdatenkatalog, der auf einer im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten, mehrschichtigen Ontologie basiert (WAGNER et al. 2018), als Datenquelle. Dieser stellt eine Kombination aus Produkt- und Objektkatalogen dar. Hierbei wird eine verteilte Datenhaltung angestrebt, die es Herstellern erlaubt ihre eigenen Produktdatenbanken zu verwenden und somit die Datenhoheit beizubehalten. Zur einfachen Zugänglichkeit der verteilten Produktdaten wird zudem eine zentrale Linkdatenbank innerhalb der Plattform platziert, von der aus Anwender nach Produkten suchen oder gezielt Produkte abfragen können. Dieser Teil des verteilten Produktdatenkatalogs ähnelt einem reinen Produktkatalog, da die Produkte in einem einheitlichen Schema vorliegen, welches nicht direkt in Modellierungssoftwares importiert werden kann. Um die direkte Anwendung in verschiedene Software-Applikationen zu ermöglichen, kann über die Plattform auf Datenverarbeitungsroutinen zugegriffen werden, die im Anschluss an die Produktsuche bzw. -abfrage ausgeführt werden können.

Die Datenverarbeitung teilt sich in drei voneinander getrennte Komponenten: Filter zur Informationsreduktion, Wrapper zur Datentransformation und Worker zur Zusammenführung unterschiedlicher Informationsquellen bzw. Informationsaufbereitung. Diese Komponenten können in sogenannte Sets zusammengeführt werden und auf durch die Plattform bereitgestellte Daten angewandt werden. Hiermit wird eine einfache Einbindung zentral zugänglicher Daten für Anwender mit individuellen Anforderungen an Informationsgehalt und Datenformat in Anwendungssoftware sichergestellt.

4 Verteilte Produktdatenkataloge

Aufbauend auf die in WAGNER et al. (2018) vorgestellte Ontologie zur Beschreibung einzelner Produkte wurde der Produktdatenkatalog ebenfalls auf der Basis von Semantic-Web-Technologien entwickelt, um so deren Vorteile nutzen zu können. Mithilfe von Linked-Data-Methoden können somit die Produktdaten, die von den Herstellern in lokalen Datenbanken (virtuelle Komponenten Datenbank – ViKoDB) bereitgestellt werden, mit einem

zentralen Abfrageknoten (virtuelle Komponenten Linkdatenbank – ViKoLink) verknüpft werden.

Durch diese Herangehensweise können Hersteller ihre ViKoDB nach ihren eigenen Wünschen und Anforderungen gestalten, bspw. hinsichtlich ihres Datensicherheitskonzepts oder des Datenbanksystems. Es müssen jedoch folgende Voraussetzungen erfüllt sein, um eine ViKoDB mit einer ViKoLink zu verbinden: Die ViKoDB muss einen SPARQL-Endpunkt zur Verfügung stellen und entweder das vorgeschlagene Produktdatenschema vorhalten oder über einen Reasoner einbinden. Dies ist erforderlich, damit verteilte, auf dem Produktdatenschema basierende Produktabfragen durch die ViKoLink erzeugt und von der ViKoDB interpretiert werden können. In einer exemplarischen Implementierung einer ViKoDB wurde ein Fuseki-Server (THE APACHE SOFTWARE FOUNDATION 2018) verwendet, der für jedes Beispielprodukt einen eigenen SPARQL-Endpunkt besitzt.

Die ViKoLink als zentraler Link-Knoten verfügt über drei Funktionalitäten: 1) gezielte Abfrage von Produktdaten, 2) Produktsuche und 3) die Verwaltung von verbundenen ViKoDBs. Die gezielte Produktdatenabfrage erfolgt über die Angabe des gewünschten Produkt-Graphen durch seinen Namespace und den SPARQL-Endpunkt, auf dem das Produkt vorgehalten wird. Diese Informationen werden innerhalb der Produktdaten – auch im verarbeiteten Zustand – hinterlegt. Eine Produktabfrage liefert als Ergebnis den gesamten Graphen der Produktbeschreibung, also die komplette Produktbeschreibung, in TTL-Serialisierung zurück.

Für die Abfrage von Produktdaten werden von der ViKoLink verteilte SPARQL-Abfragen basierend auf den Suchkriterien und Randbedingungen generiert. Die Suchkriterien können in einem vorgegebenen JSON-Schema übergeben werden und verschachtelte Kriterien beinhalten. Die Produktsuche soll auch parametrisch beschriebene Produkte, d. h. Produkte mit innerhalb von Wertebereichen variablen und ggf. untereinander abhängigen Eigenschaften, umfassen können. Um das zu erreichen, wird von der ViKoLink ein Modul zur Auswertung der dem Produkt hinterlegten Parametrik angesprochen. Diesem werden die bei der Suche vorgegeben Kriterien gemeinsam mit den erforderlichen Daten des zu auszuwertenden parametrischen Produkts übergeben. Resultiert die entsprechende Konfiguration in einem eindeutigen Ergebnis, wird dieses als Treffer der Suche zurückgegeben. Bei verschachtelten Abfragen ist es möglich, dass das parametrische Produkt in verschiedenen Konfigurationen die Suchkriterien erfüllt. Um den Datenverkehr zu reduzieren, werden die verteilten Abfragen lediglich an jene Endpunkte gerichtet, von denen bekannt ist, dass sie die gewünschten Produktkategorien anbieten. Die Auswahl geeigneter, verfügbarer Endpunkte mit passenden Produktkategorien erfolgt mittels einer SQLite Datenbank, die neben den SPARQL-Endpunkten auch Informationen über die enthaltenen Produktkategorien und Hersteller enthält. Das Ergebnis einer Produktsuche ist eine TTL-Datei, die mehrere Graphen enthalten kann. Jedes auf die Anfrage passende Produkt wird mit einer vordefinierten Auswahl von Informationen in dieser Datei beschrieben. Sollten zusätzliche oder genauere Informationen notwendig sein, müssen die Produkte gezielt einzeln abgefragt werden.

Da die Datenbank der angebundenen SPARQL-Endpunkte gepflegt werden muss, konzentriert sich die dritte Funktionalität der ViKoLink auf diese Aufgabe. Hersteller können ihre ViKoDBs registrieren, indem sie deren SPARQL-Endpunkte mit Informationen des Anbieters der ViKoDB an einen Webservice der ViKoLink schicken. Zusätzliche Informationen, bspw. bezüglich der vorgehaltenen Produktkategorien, werden anschließend auto-

matisch durch die ViKoLink abgefragt. Neben der Erzeugung neuer Verknüpfungen können zudem vorhandene Verknüpfungen geändert und gelöscht werden.

Für eine prototypische Umsetzung des verteilten Produktdatenkatalogs wurde die ViKoLink als Java-Applikation implementiert, die über einen Fuseki-Server verteilte Abfragen ausführen kann. Die Datenbank zur Verwaltung von ViKoDB-SPARQL-Endpunkten wurde mit SQLite umgesetzt und die Anbindung an das Modul zur Auswertung der Parametrik erfolgt über Webservices. Das Modul selbst wurde ebenfalls als Java-Applikation implementiert und greift über den Fuseki-Server und verteilte Abfragen auf die Produktdaten einzelner Produkte zu. Nach einem Auslesen der in der Parametrik der Beschreibung hinterlegten Gleichungen werden diese einem Mathematiksystem (hier SageMath, (SAGEMATH 2018)) zur Lösung übergeben und abschließend die Ergebnisse in einen temporären Produktgraphen zurückgeschrieben.

5 Datenverarbeitung

Über die Plattform sind zum einen Daten aus den verteilten Produktdatenkatalogen und zum anderen Daten einzelner Projekte verfügbar. Zur Nutzung dieser Daten innerhalb von Anwendungssoftware ist es erforderlich diese entsprechend derer Anforderungen und denen der Anwendungsfälle der Nutzer aufzubereiten. So müssen bspw. Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen, wie Produkt-, Gebäude- und Projektdaten, gefiltert oder auch zusammengeführt werden, um eine ganzheitliche Datenverarbeitung zu realisieren. Überdies muss es möglich sein, heterogene Daten in ein jeweils passendes Zielformat umzuwandeln.

Das im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeitete Konzept zur Datenverarbeitung umfasst ein Framework zur modularen Ausführung von Programmcode. Die durch Programmcode abgebildeten Informationsreduktionsroutinen, Datentransformations- oder Datenaufbereitungsmethoden können so als Komponenten auf die vorliegenden Daten angewandt werden. Dies ermöglicht auch bereits bestehende Vorgehen z. B. zur Filterung oder Reduktion von Daten zu integrieren.

Innerhalb der Datenverarbeitung werden drei Typen von Komponenten ihrer Funktionen nach unterschieden: Filter zur Informationsreduktion, Wrapper zur Datentransformation und Worker zum Zusammenführen und Aufbereiten von Informationen. Diese sind prinzipiell gleich aufgebaut, werden jedoch durch ihre Funktionalität differenziert, um möglichst modulare Bestandteile der Datenverarbeitung zu erhalten, die in mehreren Anwendungsfällen verwendet werden können. Die einzelnen Komponenten können zur Ausführung in beliebige Sets zusammengefasst werden, sodass Planer zu ihrem Anwendungsfall passende Zusammenstellungen dieser Komponenten zur Ausführung erstellen und auswählen können.

Filter: Unter Berücksichtigung des modularen Ansatzes der Datenverarbeitung sind die Filter-Komponenten ausschließlich zur Informationsreduktion vorgesehen. Zudem sind Filter möglichst allgemeingültig zu formulieren (z. B. „Entferne alle Wände“), sodass sie in anderen Kontexten wiederverwendet werden können. Ein Filter besitzt exakt eine Input- und eine Output-Datei, deren Datenformate gleich sein müssen. Mehrere Filter können wiederum in einem Filterpaket zur weiteren Verwendung zusammengefasst werden.

Wrapper: Zur Datentransformation wird die Wrapper-Komponente verwendet. Diese dient ausschließlich zur Übersetzung der Daten; eine Änderung oder Reduktion der in der Datei enthaltenen Informationen ist nicht Teil dieser Komponente. Ebenso wie die Filter besitzen Wrapper genau eine Input- und eine Output-Datei, allerdings mit unterschiedlichen Datenformaten.

Der Aufbau der Wrapper hängt davon ab, ob das gewünschte Datenformat offen oder geschlossen ist. Im Idealfall ist Ersteres der Fall: Die Transformation erfolgt vollständig innerhalb der Komponente auf der Plattform. Dieser universelle Ansatz konvertiert das eingehende Format in das gewünschte Format, sodass die Daten anschließend von Anwendern heruntergeladen und in jeder Software verwendet werden können, die das Format unterstützt. Ist das Zielformat geschlossen, stellt sich das Verfahren komplexer dar und wird in zwei Schritte unterteilt: 1) Transformieren von Daten in ein einfaches Austauschformat, z. B. JSON oder XML, innerhalb einer Komponente auf der Plattform und Bereitstellung der Datei über einen Webservice. 2) Aufrufen einer Erweiterung der Software des Zielformats (z. B. Autodesk Revit) zum Empfangen der Daten über den Webservice. Die Erweiterung kann dann die beschriebenen Objekte und Informationen unter Verwendung der API des Programms in das proprietäre Zielformat übersetzen. Hierdurch sind letztgenannte Wrapper softwarespezifisch und direkt abhängig von der API der Software. Sie müssen separat entwickelt und bei Software-Updates ggf. aktualisiert werden.

Worker: Ergänzend zu den Komponenten zur Informationsreduktion und Datentransformation können Worker-Komponenten Informationen aus mehreren Quellen zusammenfügen oder verarbeiten. Sie können bspw. zur automatisierten Übersetzung von Fachbegriffen und Bezeichnungen innerhalb der Produktdaten unter Zugriff auf das bSDD genutzt werden. Entsprechend gibt es für Worker keine Einschränkungen bezüglich der Input- und Output-Dateien, weder in Bezug auf deren Anzahl noch deren Datenformat.

Sets: Zur Durchführung der gesamten Datenverarbeitung können Filter und Filterpakete mit Wrappern und Workern kombiniert werden. Das aus dieser Kombination entstehende Set stellt die Anforderung, dass das Datenformat der Output-Datei einer Komponente dem der Input-Datei der darauffolgenden Komponente gleichen muss. Um auch die Extraktion unverarbeiteter bzw. teilverarbeiteter Daten zu ermöglichen, können die einzelnen Komponenten auch leer sein, d. h. keinen ausführbaren Programmcode enthalten. Dadurch ist es bspw. möglich, ungefilterte Daten im ursprünglichen Format zu extrahieren, ohne einen rechnerischen Mehraufwand zu erzeugen.

6 Anwendungsfälle

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde das Konzept der Plattform vor dem Hintergrund verschiedener Anwendungsfälle erarbeitet. Diese beinhalten die verteilte Produktdatenhaltung, Produktsuche und Produktdatenaufbereitungen für ein geschlossenes Datenformat (RFA, Autodesk Revit Family) sowie ein offenes Format (TXT).

Die verteilte Produktdatenhaltung sowie die Produktsuche wurden durch den Einsatz einer ViKoLink und mehrerer ViKoDBs umgesetzt. Für die Produktsuche wurde ein Webinterface zur Formulierung und Visualisierung geschaffen.

Die Produktdatenaufbereitung wurde mithilfe der Anwendungsfälle der Integration der Produktdaten in eine Modellierungssoftware (Autodesk Revit) und der Durchführung von Simulationen zur Dimensionierung eines gebäudeintegrierten Photovoltaik-Systems untersucht. Zu diesem Zweck wurden unterschiedliche Filter und Filterpakete erstellt, wobei darauf geachtet wurde, dass die Filter möglichst wiederverwendbar gestaltet wurden. Weiterhin wurden ein Wrapper für offene Datenformate und einer für ein geschlossenes Datenformat (über Zugriff auf die Autodesk Revit API) implementiert. Überdies wurde bei beiden Anwendungsfällen eine Übersetzung der Produktdaten entsprechend der vom Anwender vorgegebenen Sprache durch Einbindung eines Workers, der auf das bSDD zugreift, berücksichtigt.

7 Zusammenfassung und Diskussion

Um aktuelle digitale Produktbeschreibungen bereitzustellen, ohne Datenredundanzen zu erzeugen, wird in diesem Beitrag ein Produktdatenkatalog basierend auf Linked-Data-Methoden vorgeschlagen. Der verteilte Aufbau des Katalogs ermöglicht es Herstellern, Produktdatenbanken auf ihren eigenen Servern in Übereinstimmung mit ihrem Datensicherheitskonzept bereitzustellen. Zukünftig sollten jedoch Ansätze zur Sicherstellung der Datensicherheit innerhalb der Plattform entwickelt werden. Neben dem Link-Knoten, der mehrere Produktdatenbanken verbindet und Schnittstellen für die Produktsuche bietet, wurde überdies ein separates Modul zur Auswertung parametrischer Produktbeschreibungen implementiert. Durch die Auswertung auf der Plattform stellt dieser Vorgang einen Engpass dar, da alle Produkte mit parametrischen Beschreibungen auf der Plattform selbst interpretiert werden müssen. Um dieses Problem zu lösen, könnte die parametrische Interpretation auf die verteilten Produktdatenbanken verlagert werden, indem die Semantic-Web-Abfragesprache SPARQL erweitert wird, ähnlich dem Ansatz von BimSPARQL.

Die Plattform umfasst außerdem ein modulares Datenverarbeitungs-Framework, das für verschiedene Anwendungsfälle und Softwareanwendungen individuell konfiguriert werden kann und die Wiederverwendung bereits bestehender Filter, Wrapper und Worker in verschiedenen Kombinationen erlaubt. Dabei müssen grundlegende Mechanismen für die sichere Integration neuer Filter, Wrapper und Worker in die Plattform definiert werden, da ein uneingeschränktes Einbinden von ausführbarem Programmcode über die Plattform Sicherheitslücken birgt (z. B. *Code Injection*).

Die in diesem Beitrag vorgestellte Herangehensweise steht vorhandenen Konzepten zur Datenbereitstellung und -verarbeitung nicht entgegen. Durch den modularen Aufbau können diese mit eingebunden werden.

Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes „Ganzheitliche Integration energetisch aktiver Fassadenkomponenten in Bauprozesse“ (SOLCONPRO 2018).

Literatur

- BIMSERVER (2018), BIMserver. <http://www.bimserver.org/> (18.06.2018).
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL LTD (2018a), Information Delivery Manuals – buildingSMART International User Group. <http://iug.buildingsmart.org/idms> (18.06.2018).
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL LTD (2018b), MVD Overview summary – Welcome to buildingSMART-Tech.org. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/mvd-overview/mvd-overview> (18.06.2018).
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL LTD (2018c), buildingSMART Data Dictionary. <http://bsdd.buildingsmart.org/> (18.06.2018).
- RIBA (2018), National BIM Library. <http://www.nationalbimlibrary.com/> (18.06.2018).
- SAGEMATH (2018), SageMath Mathematical Software System – Sage. <http://www.sagemath.org/> (18.06.2018).
- SOLCONPRO (2018), solconpro. <http://www.solconpro.de/> (18.06.2018).
- THE APACHE SOFTWARE FOUNDATION (2018), Apache Jena – Home. <https://jena.apache.org/index.html> (18.06.2018).
- WAGNER, A., MÖLLER, L. K., ELLER, C., LEIFGEN, C. & RÜPPEL, U. (2018), An Approach for the Holistic Integration of Multi-Functional Façade Components into Buildings' Lifecycles. In: MELA K., PAJUNEN S. & RAASAKKA V. (HRSG.), 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering Conference Proceedings, 17, 951–958. Tampere, Finland.
- WAGNER, A., MÖLLER, L. K., LEIFGEN, C. & RÜPPEL, U. (2018), Describing multi-functional building products using Semantic Web Technologies. In: 12th European Conference on Product and Process Modelling, Copenhagen, Denmark. Im Druck.
- ZHANG, C., BEETZ, J. & DE VRIES, B. (2017), BimSPARQL: Domain-specific functional SPARQL extensions for querying RDF building data. In: Semantic Web 1 (2017) 1–17.

Digitale Taktsteuerungstafel zur Unterstützung einer Lean Construction-basierten und digitalen Arbeitsweise

Christian Leifgen

Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen ·
Technische Universität Darmstadt · Franziska-Braun-Str. 7 · 64287 Darmstadt
E-Mail: leifgen@iib.tu-darmstadt.de

Während der Ausführungsphase von Bauprojekten muss im Rahmen des Baustellencontrolings eine permanente Überwachung und Steuerung aller Herstellungsprozesse erfolgen. Die Grundlage dazu bilden die stetige Verfügbarkeit und Visualisierung wichtiger Informationen für die Bauleitung. Dazu werden bei einer Lean Construction-basierten Arbeitsweise verschiedene Prinzipien angewandt und Werkzeuge eingesetzt. Ein solches Werkzeug sind Taktsteuerungstafeln. Auf ihnen können Informationen in Form von Grundriss- und Bauzeitenplänen, allgemeinen Baustelleninformationen u. v. m. dargestellt werden. Anhand dieses Beispiels wird aufgezeigt, wie durch eine Digitalisierung, Erweiterung und Anpassung der bisherigen Arbeitsweise im Sinne der Methodik des Building Information Modeling und des Lean Construction-Ansatzes die Praxis unterstützt werden kann.

Keywords: BIM, BIM2Field, Lean Construction, Taktsteuerungstafel

1 Einleitung

Seit dem Beginn der Industrialisierung im 18. Jahrhundert haben sich die Arbeitsweisen bei der Produktion und dem Vertrieb von Gütern stetig weiterentwickelt. Die letzten beiden großen Schritte dieser Entwicklung waren die Einführung der Computertechnologie und die dadurch ermöglichte Automatisierung vieler Arbeitsabläufe in allen Industrien. Eng mit diesen Veränderungen in den Arbeitsweisen verbunden war und ist eine stetig zunehmende Steigerung der Produktivität. Verglichen mit anderen Wirtschaftszweigen stagniert diese im Bauwesen jedoch seit vielen Jahren nahezu (AGARWAL et al. 2016). Ein wesentlicher Grund dafür liegt in der trägen Adaption neuer Technologien und Denkansätze in der Bauwirtschaft, begründet u. a. durch eine geringe Motivation für und Aufgeschlossenheit gegenüber Veränderungen. Solche technologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Veränderungen, wie bspw. die digitale Transformation oder Einführung innovativer (Geschäfts-) Modelle rücken sehr langsam und häufig nur durch äußeren Druck in das Blickfeld der Unternehmen.

1.1 Problemstellung

Die Building Information Modeling-Methodik (BIM) und Lean Construction (LC) sind zwei komplexe Ansätze, deren Verständnis ein hohes Maß an Fachwissen voraussetzt. Zu ihrer Einführung und Umsetzung sind umfassende Konzepte erforderlich. Ihre langsame und zurückhaltende Einführung ist ein sehr deutliches Beispiel für die o. g. träge Adaption neuer Herangehens- und Denkweisen. Sie spiegelt aber auch strukturelle Probleme in der

deutschen Bauwirtschaft (fragmentierte Unternehmenslandschaft, fehlende Normen / Gesetze, komplexe Abrechnungsgrundlagen, konfrontative Mentalität etc.) wider. Neben der hohen Komplexität hindert auch das Fehlen passender, praktisch nutzbarer Werkzeuge die Einführung. Die Anwendung von LC ist i. A. mit dem Erfassen, Verarbeiten und Auswerten einer großen Menge an Daten resp. Informationen verknüpft. Im Rahmen der Bauausführung führt dies gerade auf der Baustelle dazu, dass diese – bislang manuell durchgeführten und zeitintensiven – Vorgänge sehr fehleranfällig sind und oft nicht konsequent durchgeführt werden.

1.2 Zielsetzung

Eine gemeinsame Einführung von LC und BIM kann Synergien schaffen, die zu Effizienz- und somit Produktivitätssteigerungen führen (KRÖGER 2017, LEIFGEN & KUJAJEWSKI 2018). Diese können dazu beitragen, sowohl unternehmensintern die Mitarbeitenden, wie auch alle Stakeholder in Projekten von der Wichtigkeit der Einführung und Anwendung beider Ansätze zu überzeugen und im Idealfall zu einer kollaborative(re)n Zusammenarbeit führen. Die Untersuchungen im Bereich der Überschneidungen und Verknüpfung von LC mit BIM zielen darauf ab, eine verstärkte Anwendung dieser beiden Ansätze in der Praxis zu fördern. Es soll die Notwendigkeit einer verstärkten Einführung verdeutlicht und anhand eines praxisnahen Konzeptes ein Vorschlag zur konkreten Umsetzung aufgezeigt werden. Das Ziel dieses Papers ist es, am Beispiel der Digitalisierung und Erweiterung von Taktsteuerungstafeln aufzuzeigen, wie konkrete Implementierungen für die Praxis aussehen und an welchen Stellen Synergien direkt nutzbar gemacht werden können.

2 Lean Construction

Lean Construction (dt.: schlanke Bauabwicklung) ist ein auf das Bauwesen adaptiertes Konzept, welches seinen Ursprung in der stationären Industrie in der sog. Lean Production (LP) hat. Die der LP und damit LC zugrundeliegende Denkweise des Lean Thinking (LT) stammt aus der Automobilindustrie. Sie wurde mit dem Toyota Production System (TPS) bereits im frühen 20. Jahrhundert rudimentär eingeführt und stetig weiterentwickelt (LEAN ENTERPRISE INSTITUTE 2018). LT stellt die auf den Kunden ausgerichtete Wertschöpfung in den Mittelpunkt allen Handelns. Dies soll durch eine hohe Prozessstabilität entlang der gesamten Wertschöpfungskette erreicht werden. Dazu wird eine stetige Verbesserung in den Bereichen Kosten, Qualität und Termintreue fokussiert. Bezeichnet wird dieses permanente Streben nach Verbesserung dem TPS nach mit KAIZEN¹ (aus dem Japanischen: Verbesserung, Veränderung zum Besseren).

2.1 Lean Construction als ganzheitlicher Ansatz

Bereits die Anwendung einzelner LC-Prinzipien oder -Werkzeuge kann einen Mehrwert bei der Durchführung von Projekten mit sich bringen. Um jedoch ihr gesamtes Potential nachhaltig nutzbar zu machen, muss die Lean Denkweise ganzheitlich über alle Ebenen im ge-

¹ KAIZEN ist im deutschsprachigen Raum auch unter dem Begriff „kontinuierlicher Verbesserungsprozess“ (KVP) bekannt (SOMMER 2016).

samen Unternehmen eingeführt werden. Ebenso allumfassend muss sie in Projekten verankert, eingeführt und umgesetzt werden. Prozesse wie auch Denkweisen der Beteiligten müssen stärker in den Fokus allen Handelns gerückt werden. Es muss ein Bewusstsein für Größen wie Werte und Verschwendungen geschaffen werden. Die einzelnen Lean-Prinzipien und -Werkzeuge bilden dabei die Basis der Umsetzung. Bekannte Beispiele sind das Anliefern von Waren gemäß dem Just-In-Time-Prinzip, die Anwendung der Zieh-, Fluss-, 0-Fehler- und Takt-Prinzipien sowie die Planung und Steuerung der Baustelle nach dem Last Planner System® und mit Hilfe von Taktsteuerungstafeln.

2.2 Taktsteuerungstafeln

Taktsteuerungstafeln (TST) stellen ein zentrales LC-Instrument zur Kontrolle und Steuerung der Prozesse auf Baustellen dar. Sie bilden die Informationsbasis der täglichen Takt- und wöchentlichen Baubesprechungen und visualisieren den aktuellen Stand der Baustelle in übersichtlicher Form. Sie sollten im Idealfall am Ort der Wertschöpfung – also in den jeweiligen Bauabschnitten auf der Baustelle und nicht ausschließlich im Bürocontainer – gut sichtbar platziert werden. So können von den Arbeitskräften bis zur Projektleitung alle an der Ausführung Beteiligten jederzeit die gewünschten Informationen einsehen. Taktsteuerungstafeln sind nicht standardisiert und können sich je nach Bauvorhaben und beteiligten Unternehmen stark voneinander unterscheiden. Die wesentlichen Bestandteile ähneln sich jedoch häufig und werden bspw. in (FIEDLER 2018, S. 169) genannt. Viele der darzustellenden Informationen können hinsichtlich ihres Status beurteilt werden. Die Visualisierung dieser Beurteilung erfolgt gemäß der Andon-Methode mit einer einfachen Ampel-Symbolik, die eine schnelle und übersichtliche Erfassung des Baustellenstandes ermöglicht.

3 Konzept einer Digitalen Taktsteuerungstafel

Ein großer Nachteil analoger Taktsteuerungstafeln besteht darin, dass Änderungen nur statisch und vor Ort (auf der Baustelle) festgehalten werden. Um einen Abgleich mit digitalen Systemen (Dokumentenmanagementsysteme, digitale Gebäudemodelle, Terminpläne, Bautagebuch u. v. m.) durchzuführen, müssen diese Änderungen digitalisiert werden. Das gleiche gilt für die entgegengesetzte Richtung: Änderungen in digitalen Systemen müssen durch Austauschen von Ausdrucken, Verschieben von Karten, Plänen etc. übernommen werden. Ein weiterer Nachteil dabei ist, dass selbst bei einer Digitalisierung der Informationen die auf der TST gesammelten Inhalte im Regelfall verteilt in verschiedenen, unabhängigen Software-Systemen vorliegen.

Es gibt bisher wenige Ansätze, Taktsteuerungstafeln zu digitalisieren. In (FIEDLER 2018, S. 221 ff.) werden bspw. drei mögliche Stufen einer digitalen Erfassung und Verwaltung der Informationen erläutert: Informationen wie bisher erfassen und manuell digitalisieren, teilautomatisierte Lösung mittels Optical Character Recognition und Datenaufnahme per App mit mobilen Endgeräten.

In dem vorliegenden Paper wird ein deutlich umfassenderer Ansatz vorgestellt, bei dem die Digitale Taktsteuerungstafel (DTST) als Kern eines Systems zur Erfassung, Zusammenführung und Darstellung aller bauablaufrelevanter Informationen dient. Sie wird mit anderen Softwaresystemen verbunden, sodass Informationen und deren Änderungen in Echtzeit

angezeigt werden können und nicht redundant abgelegt werden müssen. Die DTST soll als webbasierte Anwendung umgesetzt werden und existiert somit nicht mehr als ein an einem bestimmten Ort physisch vorhandenes System, sondern ist ortsungebunden zugreifbar.

3.1 Anwendungsfälle und Zielgruppen

Die bisherigen Anwendungsfälle von und Arbeitsweisen mit TSTn sollen nicht ersetzt, sondern durch einen verstärkten Einsatz digitaler Technologien unterstützt und erweitert werden. Durch das Hinzukommen neuer Funktionalitäten, wie einer dynamischen Informationsvisualisierung und einer vernetzten Bereitstellung von Informationen, werden zudem neue Anwendungsfälle ermöglicht. Die üblichen täglichen Taktbesprechungen und wöchentliche Taktabsicherungsbesprechungen sind somit genauso möglich, wie die Bereitstellung einer erweiterten Informationsbasis für Arbeitskräfte, Vorarbeiter und Poliere. Die DTST kann darüber hinaus als Werkzeug zur Berichterstattung an das Management genutzt werden. In allen Fällen ist die Bauleitung als zentrale Stelle und Hauptanwender beteiligt.

3.2 Anforderungen

Aus den o. g. Anwendungsfällen wurden Anforderungen an die DTST abgeleitet. Diese werden dahingehend unterschieden, ob sie sich auf die zu entwickelnde Software, die einzusetzende Hardware oder beide Bereiche beziehen. Sie sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Anforderungen an die DTST, s: softwareseitig, h: hardwareseitig

#	Name	Beschreibung	s/h
A 1	Sichten	Da sich die Anwender und Anwendungsfälle stark unterscheiden, muss es möglich sein, verschiedene Sichten auf die DTST darzustellen.	s
A 2	Benutzerfreundlichkeit	Da sich die projektbezogenen Anforderungen an eine DTST von Projekt zu Projekt unterscheiden können, sollen sowohl die Einrichtung als auch die Bedienung intuitiv möglich sein.	s
A 3	Baustellentauglichkeit	Der Haupteinsatzort der DTST ist die Baustelle. Es müssen Hardwaresysteme eingesetzt werden, die physisch robust sind. Ebenso muss die Visualisierung in einem angemessenen Maßstab erfolgen.	h
A 4	Zuverlässigkeit	Da die DTST ein zentrales Element zur Steuerung der Wertschöpfung ist, muss diese auch bei Störungen bspw. einem Ausfall der Kommunikationsinfrastruktur einsatzfähig sein.	h,s
A 5	Datensicherheit	Da auf verschiedene Datenquellen zugegriffen wird, muss sichergestellt sein, dass Nutzer nur auf die für sie zugänglichen Informationen zugreifen können.	s
A 6	Inbetriebnahme & Ansprechbarkeit	Die DTST soll schnell und ohne tiefgehende IT-Kenntnisse in Betrieb zu nehmen und ansprechbar sein.	h,s
A 7	Mobil	Da die DTSTn am Ort der Wertschöpfung vorhanden sein sollen, müssen sie mit fortschreitendem Bauablauf mit den Bauabschnitten und Geschossen mitwandern können.	h
A 8	Skalierbarkeit	Für jeden Anwendungsfall sollen nur benötigte Informationen in der richtigen Detaillierungsstufe dargestellt werden können.	s
A 9	Verfügbarkeit in versch. Sprachen	Da Personen vieler Nationalitäten auf Baustellen tätig sind, sollen Übersetzungen in deren Landessprachen vorhanden sein.	s

3.3 Bestandteile

Die Bestandteile der DTST sind in Tabelle 2 mit den zugrundeliegenden Datenquellen aufgeführt. Sie sind dahingehend gegliedert, ob sie mit dem Bauablauf veränderlich (dynamisch) sind oder ob sie sich über den Bauablauf hinweg nicht oder nur sehr selten ändern (statisch). Dies ist von Bedeutung, da alle dynamischen Inhalte bei herkömmlichen TST permanent manuell aktualisiert werden müssen. Weiterhin werden die Bestandteile hinsichtlich des aktuellen Standes in der Praxis eingeordnet. Viele existieren bereits unabhängig voneinander, können durch die Digitalisierung allerdings (stark) erweitert werden. Durch die Nutzung digitaler Technologien können zudem Inhalte dargestellt und Funktionen bereitgestellt werden, die mit herkömmlichen analogen TST nicht abbildbar sind.

Tabelle 2: Bestandteile und Datenquellen der DTST, d: dynamisch, s: statisch

#	Bestandteile	Datenquellen	d/s	Stand
BS 1	Taktpläne Grundrissdarstellungen der Bauabschnitte mit Darstellung der Taktabschnitte und Arbeitsrichtungen	Digitale Gebäudemodelle	d	In der Praxis üblich, Digitalisierung und Erweiterung durch DTST
BS 2	Terminpläne General-, Steuerungs- und Detailterminpläne	Terminpläne	d	
BS 3	Baustellenstatus a. Qualität (Bewertung der Leistungen) b. Ordnung c. Sauberkeit d. Arbeitssicherheit	Digitales Bautagebuch, Projektplattform	d	
BS 4	Logistik und Material a. Termintreue b. Übersicht aktueller Lieferungen (Position, Ankunft etc.)	Projektplattform, digitale Kartendienste	d	
BS 5	Projekt- / Baustelleninformationen a. Informationen zu Beteiligten (Unternehmen, Bauherr etc.) b. Baustellenversorgung c. Montageanweisungen, Gefährdungsbeurteilungen d. Notfallinformationen e. Sicherheitshinweise f. Ansprechpartner	Projektplattform	s	In der Praxis üblich, Digitalisierung durch DTST
BS 6	Kennzahlen	Projektplattform	d	
BS 7	Kanboard(s)	Digitale Kanboard Anwendung	d	In der Praxis nicht üblich, neu durch DTST
BS 8	Visualisierung & Simulationen a. Interaktives nD Gebäudemodell b. Bauablauf c. Kollisionsprüfungen	Digitale Gebäudemodelle, Terminpläne	d	

3.4 Funktionalitäten

Abgeleitet aus den Anforderungen und Anwendungsfällen ergeben sich benötigte Eigenschaften und Funktionalitäten der DTST:

1. Es soll ein modulares System entwickelt werden, in dem verschiedene Bausteine frei angeordnet und individuell miteinander zu Sichten (inkl. Templates bspw. für verschiedene Vertragsmodelle oder Bauprojekttypen) kombiniert werden können.
2. Die Bausteine sollen in verschiedenen Detaillierungstiefen dargestellt werden können.
3. Die Steuerung soll (hauptsächlich) über Touch-Eingaben erfolgen.
4. Der Zugriff muss an Personen(gruppen) gebunden und einschränkbar sein.
5. Die Datenerfassung und -manipulation soll über Eingabegeräte (Maus, Tastatur), aber auch über Spracheingaben oder verknüpfte mobile Geräte erfolgen können.

4 Technische Umsetzung der Digitalen Taktsteuerungstafel

4.1 Benötigte Hardware

Zur Visualisierung und Bereitstellung der Interaktionsmöglichkeiten sind große Touchscreens oder Beamer mit Touch-Funktionalität geeignet (SONY MOBILE 2018). Zusätzlich wird ein einfacher Computer mit Internetzugriff, bspw. ein Raspberry Pi, zur Ausführung eines Internetbrowsers sowie ein Server zur Bereitstellung der Anwendung selbst benötigt. Als hardwareseitige Lösung zur Identifikation und Authentifizierung wird die RFID Technologie eingesetzt werden (ZWINGER et al. 2014).

4.2 Software

Im Sinne einer konsistenten und möglichst robusten Datenhaltung sollen die anfallenden Daten nicht redundant in selbstdefinierten Datenbanken abgelegt, sondern über Verknüpfungen zu anderen Datenhaltungsstrukturen eingebunden werden. Dazu wird eine webbasierte Umsetzung erarbeitet, mit welcher ein plattformunabhängiger Zugriff und die ständige Bereitstellung benötigter Informationen sichergestellt wird.

4.3 Aktueller Stand der Entwicklung

Derzeit (Juli 2018) werden die in Kapitel 3 beschriebenen Datenquellen dahingehend untersucht, wie sie in eine am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen der TU Darmstadt im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit entwickelten Webanwendung integriert werden können. Deren Basis bildet ein Node.JS Server (NODE JS FOUNDATION 2018). In der Anwendung wird z. Z. ein in Autodesk BIM 360 hinterlegtes Gebäudemodell mit Hilfe des Autodesk Forge Viewers angezeigt (AUTODESK INC. 2018A, 2018B). Dieses dient einerseits zur allgemeinen Informationsbereitstellung über das Gebäude in einer 3D-Ansicht, wie auch andererseits in einer 2D-Ansicht zur Abbildung der zuvor im Modell definierten Taktabschnitte. Die von den Taktabschnitten abhängige Visualisierung wird durch eine Verknüpfung von Bauteilen des Modells mit Vorgängen aus einem (Steuerungs-) Terminplan ermöglicht.

5 Anwendung des Konzeptes

Im Hinblick auf die Anwendung der DTST in der Praxis müssen technische sowie soziale Herausforderungen beachtet werden, die eine Einführung dieser digitalen Arbeitsweise hemmen könnten. Diese finden sich zum Teil in den Anforderungsdefinitionen wieder, können jedoch nicht vollständig durch die technische Umsetzung abgedeckt werden. Gerade die sozialen Herausforderungen müssen von der Unternehmensführung identifiziert und systematisch bewältigt werden.

Softwareseitig stellen im Rahmen der Implementierung der DTST die verteilten und heterogenen Daten die größte Herausforderung dar. Es gibt verschiedene Ansätze, diese Daten aus unterschiedlichsten Datenquellen zusammenzuführen. Im Sinne des nD-Ansatzes können digitale Fachmodelle bspw. mit Zeit-, Kosten- oder Logistikinformationen verknüpft, zusammengeführt und anschließend auf der DTST visualisiert werden (LEIFGEN & KUJAJEWSKI 2018). Ebenso können Terminpläne, Dokumente und weiterführende Informationen aus (Projekt-) Managementsystemen, wie bspw. ceapoint DESITE MD, Oracle Primavera oder Autodesk BIM 360 abgefragt und dargestellt werden. Um einen Einsatz in realen Projekten zu unterstützen, muss die DTST leicht auf die jeweiligen Randbedingungen anpassbar sein. Dies umfasst neben der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Modularität der Zusammenstellung einzelner Bestandteile auch die Möglichkeit zur Integration jeweils anderer Datenquellen.

Die eingesetzte Hardware muss baustellentauglich sein, d. h. gegen äußere Einwirkungen wie Staub und Stöße geschützt werden. Ein Nachteil bei der digitalen Darstellung der TST-Inhalte kann die zur Darstellung verfügbare Fläche sein. Abhängig von Auflösung und Darstellungsfläche können ggf. weniger Informationen zeitgleich dargestellt werden als bei analogen TST.

Aufgrund des großen Funktionsumfangs müssen die Nutzer der DTST – wie auch bei herkömmlichen TST – in der Anwendung geschult werden. Eine Herausforderung stellt weiterhin deren Aufgeschlossenheit gegenüber neuen Technologien und Arbeitsweisen dar. Insbesondere Lean Thinking erfordert eine hohe Bereitschaft zu einer offenen, positiven Fehlerkultur. Auch aufgrund der breiten Altersverteilung des Baustellenpersonals ist auf die Nutzer, also die Menschen vor Ort, die das System bei der Ausübung ihrer Arbeit unterstützen soll, besonderes Augenmerk zu legen und bspw. durch Befragungen verschiedene Bedienkonzepte und weitere Anforderungen zu evaluieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In diesem Paper wird ein Ansatz zur Digitalisierung und Erweiterung von Taktsteuerungstafeln vorgestellt. Auf solchen kann gegenüber den herkömmlicherweise analogen Umsetzungen ein deutlich größeres Spektrum an Informationen bereitgestellt werden. Sie können zudem mit anderen Informationssystemen vernetzt werden und sind damit stets auf dem aktuellen Stand. Dies ist u. a. dann von Vorteil, wenn mehrere solcher DTSTn auf der Baustelle platziert werden, da Aktualisierungen automatisch übernommen werden und somit

Zeit eingespart und Fehler reduziert werden. Durch die Möglichkeit, verschiedenartige Informationen abbilden zu können, kommen neue Anwendungsfälle hinzu, die mit analogen TST nicht möglich sind. DTST stellen gemeinsam mit ihren Benutzern ein soziotechnisches System dar. Herausforderungen bei dessen Einführung und Umsetzung können bspw. die hohen Anschaffungskosten, eine höhere Störungsanfälligkeit und die Akzeptanz gerade bei älterem Baustellenpersonal sein.

6.2 Ausblick

In künftigen Arbeiten wird übergeordnet die Einordnung von Lean Ansätzen in Verknüpfung mit der fortschreitenden Digitalisierung weiter untersucht werden. Das Beispiel der digitalen Taktsteuerungstafel wird dabei weiter ausgearbeitet und in Form einer Demonstrationsanwendung weiter implementiert werden. Darauf basierend soll eine Evaluation in der Praxis durchgeführt werden, in der Produktivitätssteigerungen, die Akzeptanz bei dem Baustellenpersonal sowie finanzielle Aspekte analysiert und zwischen der bisherigen und der in diesem Beitrag vorgeschlagenen Arbeitsweise verglichen werden.

Literatur

- AGARWAL, R., SHANKAR, C. & SRIDHAR, M. (2016), Imagining construction's digital future. McKinsey & Company. www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/imagining-constructions-digital-future (25.07.2018).
- AUTODESK, INC. (2018a), BIM 360 - Construction Management Software. www.bim360.autodesk.com/ (14.06.2018).
- AUTODESK, INC. (2018b), Forge. www.forge.autodesk.com/ (14.06.2018).
- FIEDLER, M. (Hrsg.) (2018), Lean Construction – Das Managementhandbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [www.doi.org/10.1007/978-3-662-55337-4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55337-4).
- KRÖGER, S. (2017), BIM in der Praxis eines Bauunternehmens. Zech Group Zentrale Technik BIM-Lean-Team. www.docplayer.org/45247712-Bim-in-der-praxis-eines-bauunternehmens-zech-group-zentrale-technik-bim-lean-team.html (13.06.2018).
- LEAN ENTERPRISE INSTITUTE (2018), Toyota Production System in the Lean Lexicon ©. www.lean.org/lexicon/toyota-production-system (25.07.2018).
- LEIFGEN, C., & KUJAJEWSKI, S. (2018), Integrated Digital and Model-Based Construction Logistics Management Based on Lean Thinking Approaches. In: Proceedings of the 35th ISARC. Berlin, Germany.
- NODE JS FOUNDATION (2018), Über Node.js. www.nodejs.org/de/about/ (14.06.2018).
- SOMMER, H. (2016), Projektmanagement im Hochbau: mit BIM und Lean Management (4. Auflage). Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- SONY MOBILE (2018), Offizielle Website für den Xperia Touch - Sony Mobile (Deutschland). www.sonymobile.com/de/products/smart-products/xperia-touch/ (14.06.2018).
- ZWINGER, U., WAGNER, S., KORTMANN, J., MEINS-BECKER, A., KELM, A., LAUBAT, L., & BREDEHORN, J. (2014), Nutzung von BIM und RFID im Bauwesen. In: KREGER, M. & IRMLER, R. (Hrsg.), 26. Forum Bauinformatik (Bd. 26, S. 107–117). Aachen: Shaker Verlag.

Towards Registration of Construction Drawings to Building Information Models

Maciej Trzeciak

Technische Universität München · Arcistrasse 21 · 80333 München · Germany ·

E-Mail: maciej.trzeciak@tum.de

The construction industry is on its way towards adapting Building Information Modeling. On one hand, this planning method based on digital models brings a number of benefits ranging from improved clash detection to further automation and development of the industry. On the other hand, however, the industry is still heavily dependent on construction drawings. To face this challenge, BIM design applications allow to derive drawings consistent with BIM models. However, due to a high level of fragmentation of the industry, construction drawings and BIM models are often exported to vendor-neutral formats and stay disjointed from each other. This fact leads to the situation that any discrepancy between them can easily arise in case of any modification of disjointed BIM models or construction drawings. In this paper, a closer look is taken at a general model-to-image registration process, and its applicability to the problem of positioning construction drawings against BIM models which is the first step towards the consistency verification between these two objects. Additionally, the author proposes the framework of a system which can be potentially used in the drawing-to-model registration process.

Keywords: BIM, construction drawings, drawing-to-model registration, 2D-3D matching

1 Introduction

The construction industry is in the process of adapting Building Information Modeling (BIM). BIM allows to generate a three dimensional digital model of a structure with a high level of associated information. On one hand, this planning technique brings a number of benefits, such as improved planning quality, clash detection, and precise calculations of quantity take-off for cost estimation. On the other hand, however, the industry is still heavily dependent on construction drawings, not least because they continue to be the obligatory and legally binding documents among contractual partners (designers, contractors, clients) and they remain to be the preferred medium of the design information delivery to the engineers and employees on construction sites. Additionally, it is common sense in the industry today, that BIM models should not be over-detailed as this would get the effort-benefit ratio out of balance. Instead, BIM practitioners agree that details should continue to be defined and delivered using conventional drawing-based approaches.

These facts imply the coexistence of construction drawings and BIM models in the industry for a significant time in the future. To face this challenge, professional BIM design applications provide deep geometric and semantic integration between 3D geometric representations of building elements and the respective 2D shapes in digital drawings and thus, allow to derive drawings consistent with 3D models. However, this consistency exists only in the proprietary formats of the respective software providers. Since the data exchange in the construction industry is of paramount importance due to its high level of fragmentation,

vendor-neutral formats have proved to be the most suitable approach. As disjointed drawings and BIM models representing the same built facility in vendor-neutral formats might be edited irrespectively of each other, inconsistencies may easily arise. It is often the case that disjointed construction drawings are further edited by modifying them and adding additional information using third party applications, which usually brings many discrepancies which currently cannot be automatically detected and must be coordinated manually. One of the steps towards the consistency verification between drawings and BIM models is the automated positioning of construction drawings against BIM models, further named the drawing-to-model registration.

2 Drawing-to-model registration

In a broader sense, the positioning of a 3D model against an image is known as the model-to-image registration (JUNG ET AL., 2016) or 3D-to-2D registration (WUNSCH AND HIRZINGER, 1996). The problem approached in this paper is actually the opposite since the idea is to register a drawing to a 3D model. Shape registration is a task of aligning two shapes in a shared coordinate system (SHAO ET AL., 2014), conceptually shown in Figure 1. The figure presents a drawing manually aligned to a BIM model. The aim of this paper is to introduce the possible automation of this process.

The shape registration process has been utilized across many various research domains, for example in sketch-based 3D shape retrieval (SHAO ET AL., 2014), or in matching aerial images to 3D building models (JUNG ET AL., 2016). The latter conclude, that the general approach to all 3D-to-2D registration problems has not been possible so far due to an individual nature of each problem. However, the following three steps have been common across most of the approaches: (1) feature extraction; (2) similarity measure and matching; (3) transformation.

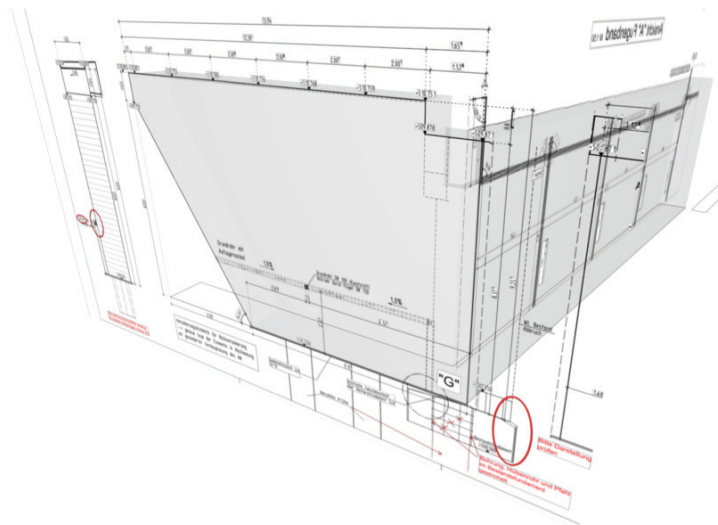


Fig. 1: Solibri: a manually aligned construction drawing to a BIM model.

2.1 Properties of extracted features

Two different shapes are not directly compared. Instead, they are usually translated into feature vectors, also called shape descriptors, which are further used for matching in order to determine how similar two descriptors are (the similarity problem is under consideration in the next section). Shape descriptors, in turn, are instantiations of a certain shape representation as defined in (IYER ET AL., 2005). This section does not address the problem of how to extract features, but what properties should be considered so that a shape representation and thus the extracted features are applicable for the drawing-to-model matching.

Shape has been the subject of fundamental research in computer vision and robotics, and many methods proposed in these fields, have been also applied to solving a vast array of other problems in various domains of science. As (PU AND RAMANI, 2006) say, there is a popular belief that the contour of an object, understood here as the outer lines of the object, is a medium used for matching two objects with each other. Therefore, most of the proposed methods concentrate on the contour matching. However, contour-based methods do not seem applicable in the registration of construction drawings to BIM models, since the drawings, for example cross-sections, usually have complex internal structure (see Figure 2). Therefore, the shape-based methods applied for the registration here, should be discriminative enough to consider the differences in internal structure.

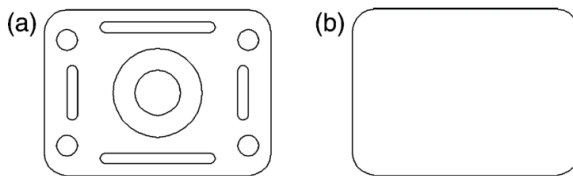


Fig. 2: The difference between a drawing (a) and its contour (b). The contour is not enough for a meaningful description of the drawing (PU AND RAMANI, 2006).

Since engineering drawings are scaled and their shape in vendor-neutral formats remains disjointed from a 3D model, their shape representation must be invariant to transformation (here understood as translation-, rotation-, and scaling-invariance) in the 2D-to-3D matching process.

(TANGELDER AND VELTKAMP, 2008) consider a few other aspects related to the 3D shape retrieval domain, a few of which seem applicable to the problem raised here. One of them is already mentioned discriminative power of a shape representation. It seems to play a role in model-to-drawing matching because the point is to capture these properties which discriminate model and drawings well enough so that they can be properly matched. However, the issue of similarity of two objects can be subjective. For example, shapes of certain building elements in construction drawings in most cases are the direct orthographic or isometric projections of their 3D shapes in BIM models. However, the exceptions are such elements as doors, which are not the direct projection of its real 3D shape, but certain icons conforming to some engineering design standards. In addition, cross-sections of walls, for example, are filled in with certain hashing. There are dimensional lines describing shapes of building elements which do not exist in 3D models in the form of shape. Instead, this information is

encoded in semantic attributes of information models. These elements cannot take part in the matching process based on shape. The question may arise if the remaining shapes are enough to unambiguously match such a drawing to a model and how the matching process is affected.

2.2 Similarity measure and matching

According to (TANGELDER AND VELTKAMP, 2008) matching is the process of determining how similar two shapes are. It seems reasonable that the term “similar” must be defined in the context of measuring the similarity between a construction drawing and a BIM model. (WEN, TANG, AND SU, 2016) claim that the focus of the model-to-image matching concentrates mainly on the shape feature similarity measurement. This means that shapes are translated into feature vectors which are further used for matching in order to determine how similar two descriptors are. It is often called a correspondences or a matching problem. As mentioned in (IYER ET AL., 2005), similarity can be measured by a similarity metric, which, for shape feature vectors, is basically a distance function between pairs of these vectors. Feature vectors can be understood as points in feature space, between which the distance is measured. (TANGELDER AND VELTKAMP, 2008) add that the term dissimilarity better corresponds to the notion of distance because small distance stands for small dissimilarity, and large distance – large dissimilarity. The similarity measure described in this section do not work for relational data structures such as graphs or trees where other methods such as exact or in-exact graph matchings are used.

Depending on application, a metric should have desired and undesired properties. Let S be a collection of shapes. Then, a distance function d on a collection S is defined as $d : S \times S \rightarrow \mathbb{R}$, with the following possible properties for all shapes x, y, z in S (TANGELDER AND VELTKAMP, 2008). Remark: not all the possible properties are listed here.

1. Identity: $d(x, x) = 0$
2. Positivity: $d(x, y) > 0$
3. Symmetry: $d(x, y) = d(y, x)$
4. Triangle inequality: $d(x, y) + d(y, z) \geq d(x, z)$

As long as most of these properties seem self-explanatory, the interesting one might be the triangle inequality. If the partial matching is desired, property 4 should not hold. Given a small distance $d(x, y)$ if a part of x matches a part of y , Figure 3 returns: (a) a small distance between a man and a centaur; (b) a small distance between the centaur and a horse; (c) a large distance between the man and the horse (large dissimilarity). Since the sum of the first two components is less than the third component, the metric with property 4 will not work for partial matching. Therefore, (FAGIN AND STOCKMEYER, 1998) proposed to formulate a weaker form of this axiom, named a relaxed triangle inequality: $c(d(x, y) + d(y, z)) \geq d(x, z)$, for a constant $c \geq 1$, if the point of a metric is to partially match objects.

Partial shape matching (as opposed to global shape matching) finds a part of a shape similar in a part of another shape. This aspect seems particularly interesting while matching detailed drawings presenting only a part of the whole model. Additionally, it is often the case that the burden of detailing is shifted from models to drawings and thus the drawings contain more details than the models. A typical example can be a detailed drawing of a steel connection which contains additionally drawn screws and thin plates usually not existing in

a BIM model. Since these screws and other additional parts partially occlude the main building elements, the need for partial shape matching arises.

A very common distance function between two shapes $x, y \in \mathbb{R}^N$ is named L_p distance (also known as Minkowski distance) and is defined as follows:

$$L_p(x, y) = \left[\sum_{i=0}^N |x_i - y_i|^p \right]^{1/p} \quad (1)$$

For $p = 2$, the metric is basically the Euclidean Distance, which is commonly used for similarity measurement.



Fig. 3: Original triangle inequality (4) does not hold under partial matching because $d(\text{man}, \text{centaur}) + d(\text{centaur}, \text{horse}) < d(\text{man}, \text{horse})$ (VELTKAMP, 2001).

2.3 Transformation

Once a drawing and a BIM model are matched well enough and the correspondences between them is established, there remains a matter of the actual alignment of these two in a shared coordinate system. The alignment process is done by the transformation i.e. translation, rotation, and scaling in a shared three dimensional space so that a drawing visually fits to a 3D model as conceptually shown in Figure 1.

According to (JUNG ET AL., 2016), the function responsible for the transformation should take into account such factors as geometric discrepancies between two data sets, the mechanism of data acquisition, and the required accuracy of the registration. The state-of-the-art solution is to compute the initial alignment based on the corresponding features and then, to apply a refine algorithm such as Iterative Closest Point – ICP algorithm (BESL AND MCKAY, 1992) for rigid transformations between two shapes (SHAO ET AL., 2014).

3 Proposed drawing-to-model registration framework

This section presents a conceptual framework for the drawing-to-model registration problem described in this paper. The idea is similar to the one used in view-based 3D Model Retrieval, in which two 3D models are similar if they look similar from different views based on the shape of these views. Accordingly, the 2D-3D matching problem is translated

into the 2D-2D one. In this framework, a drawing is supposed to be registered in a specific place of the three dimensional space of a BIM model if the projection derived from that place is the most similar to the query drawing. Therefore, two major things are fundamental in this approach: (1) The derivation system which builds a set of isometric projections based on a BIM model; (2) Shape representation and the related similarity measure method based on which a query drawing is compared to the projections derived from a BIM model.

The derivation system is supposed to work in a way that decreases a number of projections to be compared with the query drawing so that the solution space is not infinite. For example, uniformly distributed projections are supposed to be derived from a BIM model in a dynamic and construction-knowledge-oriented way following certain rules stipulated by the algorithm (for example, cross-sections are usually perpendicular/parallel to the main directions of a model and not at a certain angle).

Shape representation should fit the purpose of comparing a query drawing with projections. It can be based on the techniques used in the domain of engineering drawing retrieval. Therefore, such properties as invariance to translation, rotation, scaling and partial matching must be considered in finding the desired shape descriptor and its dissimilarity measure method. Figure 4 presents a scheme of the proposed system.

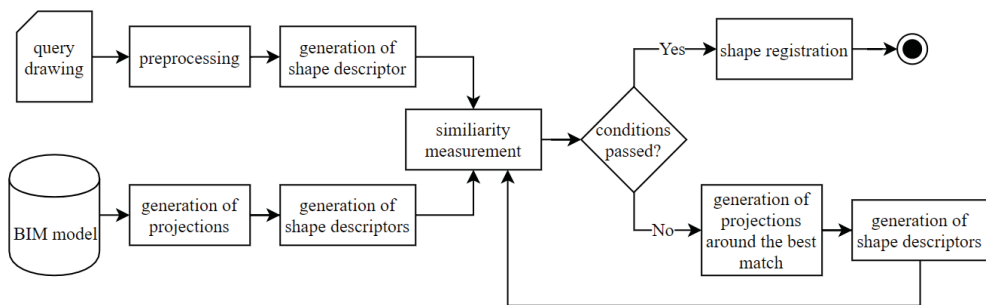


Fig. 4: Proposed system for the drawing-to-model registration.

Since the shape of building elements in construction drawings in most cases is the direct orthographic/isometric projection of their 3D shapes in BIM models this approach can be applied after certain preprocessing of a query drawing and projections. In addition, the thickness of line segments must be considered so that only the elements which are cut by a cross-section (represented by a thick line) can be compared to a projection. In this way, the problem of a depth shown in the drawing can be eliminated. Besides, thin line segments, text and annotations must be excluded from the matching process.

4 Summary

In this paper, a problem of drawing-to-model registration in the construction industry is introduced. The author presents a general approach to the 3D-to-2D registration problem and renders it to the specific nature of positioning construction drawings against a BIM

model. Properties of extracted features, the matching process, and the transformation of two shapes are considered in terms of their applicability to the raised problem. Eventually, the author proposes a conceptual framework for the drawing-to-model registration.

Acknowledgements

This work is supported by the ALLPLAN GmbH and Nemetschek Group. The author would like to gratefully thank these companies for making this research possible.

Literature

- BESL, PAUL J., AND NEIL D. MCKAY. 1992. "Method for Registration of 3-D Shapes." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14 (2): 239–56. <https://doi.org/10.1117/12.57955>.
- FAGIN, RONALD, AND LARRY STOCKMEYER. 1998. "Relaxing the Triangle Inequality in Pattern Matching." *International Journal of Computer Vision* 28: 219–31.
- IYER, NATRAJ, SUBRAMANIAM JAYANTI, KUIYANG LOU, YAGNANARAYANAN KALYANARAMAN, AND KARTHIK RAMANI. 2005. "Three-Dimensional Shape Searching: State-of-the-Art Review and Future Trends." *Computer-Aided Design* 37 (5): 509–30. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.07.002>.
- JUNG, JAEWOOK, GUNHO SOHN, KIIN BANG, ANDREAS WICHMANN, COSTAS ARMENAKIS, AND MARTIN KADA. 2016. "Matching Aerial Images to 3D Building Models Using Context-Based Geometric Hashing." *Sensors* 16 (6): 932. <https://doi.org/10.3390/s16060932>.
- PU, JIANTAO, AND KARTHIK RAMANI. 2006. "On Visual Similarity Based 2D Drawing Retrieval." *Computer-Aided Design* 38 (3): 249–59. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2005.10.009>.
- SHAO, TIANJIA, WEIWEI XU, KANGKANG YIN, JINGDONG WANG, KUN ZHOU, AND BAINING GUO. 2014. "Discriminative Sketch-Based 3D Model Retrieval via Robust Shape Matching." *Computer Graphics Forum* 30 (7): 2011–20. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2011.02050.x>.
- TANGELDER, JOHAN W H, AND REMCO C. VELTKAMP. 2008. "A Survey of Content Based 3D Shape Retrieval Methods." *Multimedia Tools and Applications* 39 (3): 441–71. <https://doi.org/10.1007/s11042-007-0181-0>.
- VELTKAMP, REMCO C. 2001. "Shape Matching: Similarity Measures and Algorithms." In *Proceedings - International Conference on Shape Modeling and Applications, SMI 2001*, 188–97. <https://doi.org/10.1109/SMA.2001.923389>.
- WEN, RUI, WEIQING TANG, AND ZHIYONG SU. 2016. "A 2D Engineering Drawing and 3D Model Matching Algorithm for Process Plant." In *Proceedings - 2015 International Conference on Virtual Reality and Visualization, ICVRV 2015*, 154–59. <https://doi.org/10.1109/ICVRV.2015.13>.
- WUNSCH, P., AND G. HIRZINGER. 1996. "Registration of CAD-Models to Images by Iterative Inverse Perspective Matching." In *Proceedings - International Conference on Pattern Recognition*, 1:78–83. <https://doi.org/10.1109/ICPR.1996.545995>.

Session 5:

Simulation und Modellierung 3 / Geoinformatik

Automatisierte Generierung eines 3D-Baumkatasters am Beispiel des KIT Campus Nord

David Kunz¹ und Andreas Geiger²

¹Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI) · Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)
Herrmann-von-Helmholtz-Platz 1 · 76344 Eggenstein-Leopoldshafen
E-Mail: david.kunz@partner.kit.edu

²Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI) · Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)
Herrmann-von-Helmholtz-Platz 1 · 76344 Eggenstein-Leopoldshafen
E-Mail: andreas.geiger@kit.edu

Die Verwendung virtueller 3D Stadtmodelle hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Stadtmodelle werden unter anderem für die Raumplanung oder für Katastrophensituationen eingesetzt. Je nach Anwendungsfall ist hierzu auch die Vegetation in Form von 3D Baummodellen zu berücksichtigen. Die Informationen bzw. Eigenschaften zur Erzeugung solcher Baummodelle können aus einem Baumkataster abgeleitet werden. Das Baumkataster des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Campus Nord liegt in Form von 2D CAD Daten vor, die durch ein digitales Geländemodell und Punktwolken Daten komplettiert werden sollen. Im Rahmen einer Masterarbeit werden die Ausgangsdaten analysiert und ein Konzept zur Generierung eines 3D Baumkatasters als CityGML Modell entwickelt.

Keywords: FME, CityGML, GIS, Baumkataster

1 Einleitung

Ein Kataster stellt ein Register oder eine Sammlung von Vermessungsdaten dar, die auf einem Grundstücksverzeichnis beruhen. Das Liegenschaftskataster verzeichnet Flurstücke mit den dazugehörigen Eigenschaften, welche im Liegenschaftsbuch und in Karten beschrieben werden. Dabei stehen im Grundbuch die privat rechtlichen Verhältnisse eines Grundstückes und im Kataster die tatsächlichen Verhältnisse (Lage, Flurstücksnummer, Art der Nutzung und Größe) (NICKLIS 2018). Neben dem Liegenschaftskataster gibt es noch weitere Kataster, wie z.B. das Baumkataster. Ein Baumkataster wird für die Verwaltung aller Bäume eines bestimmten Bereichs genutzt. Für die Erfassung der Baumdaten existieren am Markt spezielle Software Werkzeuge. Mit diesen lassen sich Bäume erfassen, kontrollieren und verwalten. In der Regel orientieren sich ein Baumkontrolleure zur Erfassung vom Bäumen mit Hilfe georeferenzierter Luftbilder. Vor Ort werden die Bäume mit einer Baumkatastersoftware auf mobilen Endgeräten erfasst. Die Information zur geographischen Lage und der dazugehörigen Höhe, kann mit Hilfe von GPS, georeferenzierten Luftbildern oder über die klassische Vermessung bestimmt werden. Weitere Zusatzinformationen wie Alter der Bäume, Durchmesser des Stammes, Durchmesser der Krone, Höhe des Baumes oder die Baumart ermittelt ein Baumkontrolleur vor Ort. Diese Informationen sind für Baumeigentümer wichtig, da beispielsweise Gemeinden im öffentlichen Raum für die Verkehrssicherheit verantwortlich sind und die Gefahr durch umstürzende Bäume oder herabfallende Äste abgewendet werden muss.

Für das Areal des Campus Nord liegen die Ausgangsdaten des Baumkatasters in Form von 2D CAD Zeichnungen vor. Diese werden in Verbindung mit einem digitalen Geländemodell, für die Bestimmung der Höhenlage, sowie mit Punktwolkendaten, zur Bestimmung der Ober- und Unterkante der Krone, in ein 3D Baumkataster in das standardisierte Format CityGML überführt.

2 Stand der Technik

Zur Verwaltung digitaler Kataster werden Geoinformationssysteme eingesetzt. Um den Datenaustausch zu vereinheitlichen, wurde durch das Europäische Parlament am 15. Mai 2007, die *INSPIRE* (Infrastructure for Spatial Information in Europe) verabschiedet. Diese Richtlinie hat die Aufgabe innerhalb der EU-Mitgliedstaaten einen einheitlichen Standard zu entwickeln und eine Geodateninfrastruktur aufzubauen. Laut einem Beitrag aus der *zfv* (Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement) mit dem Titel „Erfolgreiche Transformation von Geodaten nach INSPIRE“, wurde zwischen 2011 und 2013 in der Bodensee Region ein Pilotprojekt durchgeführt, um verschiedene Geodaten zusammenzuführen. Das Gebiet wurde ausgewählt, da es dort bereits seit 2003 mit dem Projekt „Bodensee-Geodatenpool“ eine langjährige Zusammenarbeit der Bodenseeanrainerländer gibt. Für das *INSPIRE*-Projekt wurde versucht aus Baden-Württemberg, Bayern, Österreich und der Schweiz Daten einheitlich, entsprechend der vorgegebenen Richtlinie, zu transformieren. Für die Datentransformation selbst wurde zum Teil die Systemplattform FME (Feature Manipulation Engine) der kanadischen Firma Safe Software verwendet. Die Testergebnisse des Projekts zeigen, dass es technisch möglich ist und die Voraussetzungen von INSPIRE zur Konvertierung von topographischen Daten und Katasterdaten einzuhalten. (KUTZNER, DONAUBAUER, MÜLLER, FEICHTNER, & GOLLER 2014).

Das Softwarewerkzeug FME wird eingesetzt, um den Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Software Produkten zu ermöglichen. FME wird als Spatial ETL (Extract, Transform, Load) Werkzeug bezeichnet, welches die Fähigkeit hat Geodaten unterschiedlichster Art einzulesen und in ein FME-internes Format zu überführen. Die Daten können mittels Werkzeuge - so genannte Transformer - bearbeitet und in ein neues Datenformat überführt werden. Die jeweiligen Werkzeuge für die Bearbeitung werden auf einer grafischen Oberfläche (Workbench) unterteilt als Reader (Einlesen der Daten), Transformer (Werkzeuge zur Manipulation) und Writer (Auslesen der Daten) (CON TERRA GMBH 2015). Darüber hinaus verwaltet die Software eine Vielzahl von Koordinatenreferenzsystemen und erlaubt die Verarbeitung von 3D-Geometrien. Für die Konvertierung werden mehr als 300 Datenformate unterstützt. Darunter befindet sich auch der internationale Standard CityGML zur Repräsentation semantischer, virtueller 3D-Stadtmodelle, der 2012 von Open Geospatial Consortium (OGC) in der Version 2.0 auf Basis von der Geography Markup Language (GML) veröffentlicht wurde (LÖWNER et al. 2013). CityGML dient dem Datenaustausch virtueller Stadtmodelle und „enthält Deklarationen für Gelände- und Wasserflächen, Gebäude, Verkehrsflächen und weitere typische Objekte der urbanen Infrastruktur“ (ZIMMERMAN 2012). Neben der geometrischen Darstellung der 3D-Elemente werden auch die semantischen Eigenschaften repräsentiert. Dadurch ist CityGML in der Lage anspruchsvolle Analyseschritte für eine Vielzahl von Praxisproblemen durchzuführen (LÖWNER et al. 2013). CityGML bietet die Möglichkeit Gebäudetypen in verschiedenen Level of Detail (LoD) darzustellen (GRÖGER et al. 2005).

- LoD-0 – Digitales Geländemodell
- LoD-1 – Gebäude als Blockmodelle
- LoD-2 – Gebäudehülle mit spezialisierten Dachformen
- LoD-3 – Gebäudehülle inkl. Fenstern und Türen
- LoD-4 – Gebäude mit Innenraummodell

Das Datenmodell CityGML ist in thematische Modelle aufgeteilt, z.B. in ein Gelände-, ein Gebäude- und ein Vegetationsmodell. Mit dem Feature *SolitaryVegetationObject* enthält das Vegetationsmodell entsprechende Definitionen um Bäume mit ihren Eigenschaften abzubilden (Abb 1).

```
<xs:complexType name="SolitaryVegetationObjectType">
  <xs:complexContent>
    <xs:extension base="AbstractVegetationObjectType">
      <xs:sequence>
        <xs:element name="class" type="gml:CodeType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="function" type="gml:CodeType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="usage" type="gml:CodeType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
        <xs:element name="species" type="gml:CodeType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="height" type="gml:LengthType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="trunkDiameter" type="gml:LengthType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="crownDiameter" type="gml:LengthType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod1Geometry" type="gml:GeometryPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod2Geometry" type="gml:GeometryPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod3Geometry" type="gml:GeometryPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod4Geometry" type="gml:GeometryPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod1ImplicitRepresentation" type="core:ImplicitRepresentationPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod2ImplicitRepresentation" type="core:ImplicitRepresentationPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod3ImplicitRepresentation" type="core:ImplicitRepresentationPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element name="lod4ImplicitRepresentation" type="core:ImplicitRepresentationPropertyType" minOccurs="0"/>
        <xs:element ref="_GenericApplicationPropertyOfSolitaryVegetationObject" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
      </xs:sequence>
    </xs:extension>
  </xs:complexContent>
</xs:complexType>
```

Abb. 1: Solitary vegetation object (GRÖGER et al. 2012)

3 Ablauf der Automatisierten Generierung

Ablauf:

1. Schritt: DWG Daten ,Analyse bzw. ,Bereinigung
 - 2D DWG Baumkataster
 - 3D Geländemodell
 - Punktwolken aus Lidar (*light detection and ranging*) Befliegungsdaten
2. Schritt: DWG Daten Georeferenzieren
3. Schritt: Geländehöhe aus dem digitalen Geländemodell extrahieren
4. Schritt: Baumhöhe aus den Lidar Daten ableiten
5. Schritt: 3D-Geometrie erzeugen
6. Schritt: Transformation in CityGML

Die Analyse der 2D DWG Pläne des Baumkatasters im CAD zeigt, dass sich die Baumtypen in drei verschiedenen Layer aufteilen lassen Laubkrone, Nadelkrone und Stamm. Dabei bildet jeweils eine Krone und der dazugehörige Stamm ein gemeinsames Baumobjekt (Abb.2). Bei größeren Baumgruppen dagegen weisen die Baumkronen keinen Stamm auf. Die Objekte bestehen jeweils aus einer Blockreferenz und enthalten Koordinaten in X und Y sowie den dazugehörigen Faktor welcher den Radius beinhaltet. Innerhalb der Baumkrone stehen Textinformationen die jeweils den Kronendurchmesser, den Stammdurchmesser und die Höhe über Normal Null (NN) beschreiben. Dabei stimmen die Geometrieeigenschaften (Radius) mit denen der Textinformation überein. Um das Baumkataster für die Transformation nutzen zu können, werden die Daten zunächst anhand bestehender Gebäude- und Vegetationskarten georeferenziert. Zur Vervollständigung der Höhe, wird das Digitale Geländemodell des Campus Nord verwendet. Aus dem Höhenmodell wird die Höhe des Fußpunktes der Baumobjekten ermittelt.

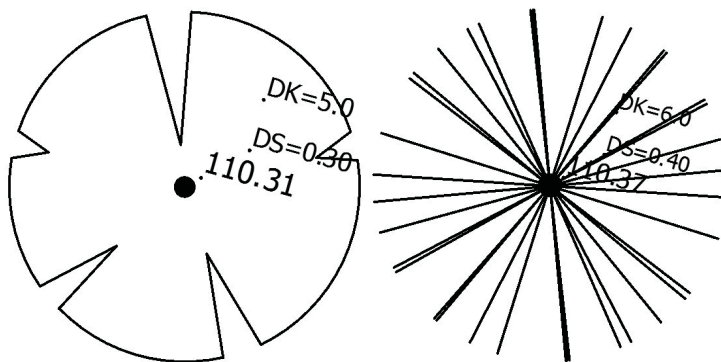


Abb. 2: links: Laubkrone und rechts: Nadelkrone, jeweils mit Stamm und Beschriftung

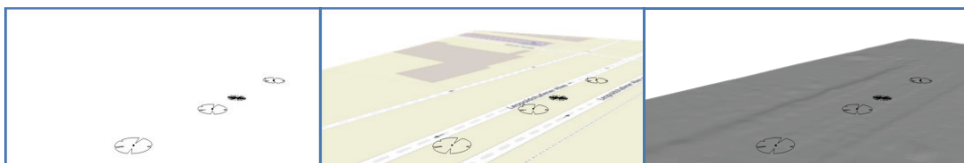


Abb. 3: links: DWG/DXF, Mitte: Georeferenz und rechts: Digitales Geländemodell

Da das Baumkataster keine Informationen über die Baumhöhen besitzt, müssen diese Information auf einem anderen Weg bezogen werden. Um an die Baumhöhen zu gelangen können die Punktwolken aus den LIDAR Daten des Campus Nord verwendet werden. Die Idee ist, die Punktwolke so zu reduzieren, dass nur die Punkte um ein zu betrachtendes Baumobjekt übrig bleiben. Dadurch entsteht für jedes Baumobjekt eine vereinzelter Punktwolke, aus der die Höhe eines Baumobjekt ermittelt wird. Ist die Baumhöhe über NN bekannt, kann zusammen mit der Geländehöhe die Höhe eines Baumes ermittelt werden.

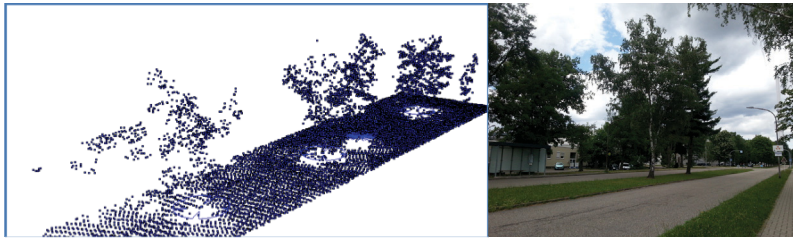


Abb. 4: links: Punktwolken und rechts: Originalbild im Gelände

Bei der Betrachtung von Baumgruppen sieht dies etwas problematischer aus. Die Punktwolke der Baumkronen bildet ein große Einzelgebilde. Dies liegt daran, dass sich die Bäume bzw. ihre Baumkrone teilweise oder ganz überschneiden (Abb. 5).



Abb. 5: links: Draufsicht Überlappung der Baumkronen, Mitte: Seitensicht der Punktwolke, rechts: Originalbild im Gelände

Nachdem alle benötigten Parameter zur Erstellung der 3D Baumobjekte und zur anschließenden Konvertierung in CityGML vorhanden sind, müssen die Werte der Parameter in der FME Workbench den jeweiligen Baumtypen zugewiesen werden. Die Erstellung der 3D Prototypen pro Baumtyp erfolgt mittels Sketchup (sketchup) im Format SketchupModell. Dieses Format lässt sich in FME einlesen und mit den entsprechenden Baumobjekten verknüpfen. Als Prototyp werden für die Laubbäume ein Kugelobjekt und für die Nadelbäume ein Kegelobjekt verwendet. Ziel ist es die 3D-Prototypen als implizite Geometrien (Laubbaum, Nadelbaum) im CityGML Format zu erzeugen. Dabei wird durch eine Transformationsmatrix mit Orientierung, Skalierung und Lage die dazugehörige Baumgeometrie transformiert. Die erstellten Bäume sollen im Ergebnis alle semantischen und Geometrischen Eigenschaften enthalten. Die Aufnahme der Daten des Baumkatasters und der Punktwolken variieren in ihrem Aufnahmedatum. Dadurch kann es, wie die Abb. 6 zeigt, vorkommen, dass gefällte Bäume des Baumkatasters in den Punktwolken noch existieren.

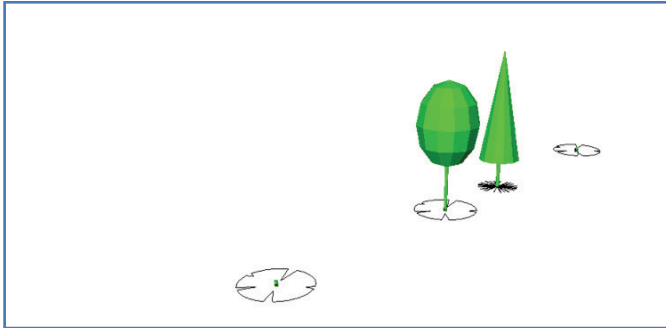


Abb. 6: Beispiel für das 3D-Baumkataster im Format CityGML

Für die Transformation in das standardisierte Datenmodell CityGML, ist es wichtig, dass in FME die Reihenfolge der Parameter entsprechend der Definitionen des CityGML Schemas eingehalten wird. FME unterstützt hierzu die entsprechenden Attribute der CityGML-Feature, in welche die Werte überführt werden können. Die Koordinaten werden über eine Transformationsmatrix übergeben. Die Daten werden in FME getrennt bearbeitet, dies beinhaltet einen eigenen Workflow für Stamm, Laubkrone, Nadelkrone und 3D-Baumgeometrie, welche danach in einen übergeordneten Workflow zusammengefügt werden. Jedes der einzelnen Objekte wird mit verschiedenen Transformern so aufbereitet, damit die notwendigen Parameter für die Transformation nach CityGML berücksichtigt werden. Dazu wird jedem Stamm die entsprechende Baumkrone zugewiesen und mit der 3D-Baumgeometrie verknüpft.

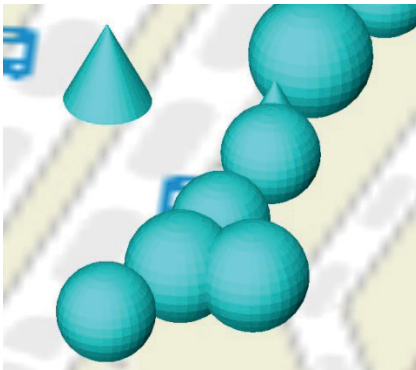


Abb. 7:
3D Auszug im CityGML Format

4 Zusammenfassung/Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird ein Transformationsprozess zur Überführung von 2D Baumkatasterdaten in Verbindung mit einem digitalen Geländemodell und Punktwolkendaten in ein 3D Baummodell vorgestellt. Der Prozess basiert auf einer entwickelten FME Workbench die als Zielformat die Daten in das standardisierte CityGML Modell überführt.

Es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, alle benötigten Daten mittels FME einzulesen, zu bearbeiten und diese in das Format CityGML zu konvertieren. Es hat sich aber auch gezeigt, dass die 2D DWG Ausgangsdaten des Baumkatasters keine doppelten Baum- oder Stammgeometrien an derselben Stelle aufweisen dürfen. Ansonsten treten bei diesen Geometrien mit identischen Koordinaten und Eigenschaften Fehlermeldungen beim Zusammenfügen von Stamm und Baumkrone auf. Visuell lassen sich die Duplikate nicht erkennen und treten daher erst als Fehler bei der Transformation in FME auf. Dies macht eine ausführliche Analyse und Prüfung der Ausgangsdaten notwendig.

Zur Fortführung des Baum Kataster liegen aktuellere Punktwolkendaten vor. Diese können zur Aktualisierung des Datenbestandes beitragen. Da hierdurch erkannt werden kann ob Bäume gewachsen oder gefällt wurden.

Neben den Daten des Campus Nord existiert auch für den Campus Ost ein Baumkataster. In einem nächsten Schritt soll nun geprüft werden inwieweit sich die entwickelte FME Workbench auch auf diese Daten anwenden lässt. Diese Daten liegen ebenfalls im DWG Format vor, unterscheiden sich aber von den semantischen Eigenschaften. Auf den ersten Blick sehen die geometrischen Daten ähnlich aus. Die Bäume sind als Krone (Blockreferenz) und Stamm (Kreis) dargestellt. Dabei enthalten alle Layer die Bezeichnung Baum anstatt Laub-Nadelkrone und Stamm. Zusätzlich existiert, im Unterschied zu den Daten des Campus Nord, eine Legende mit den verschiedenen Baumarten, die über ein Kürzel als Textinformation mit dem jeweiligen Baumobjekt verknüpft ist. Jedes Kronen- und Stammobjekt verfügt über einen Radius und die Geometrien besitzen eine geographische Lage (Hochwert, Rechtswert). Da hier auch ein Geländemodell vorliegt, kann dieses ebenfalls zur Vervollständigung der Höhe verwendet werden. Auch ein Punktwolkenmodell für die Berechnung der Baumhöhe liegt vor. Von daher muss geprüft werden, ob und in wieweit der vorhandene Workflow vom Campus Nord auch auf diese Daten angewendet werden kann.

Literatur

- CON TERRA GMBH. (2015), FME Desktop Das deutschsprachige Handbuch für Einsteiger und Anwender. Wichmann.
- GRÖGER, G., BENNER, J., DÖRSCHLAG, D., DREES, R., GRUBER, U., LEINEMANN, K. et al. (2005), tolu.giub.uni-bonn. www.tolu.giub.uni-bonn.de/grk/Publications/PublicationsM-O_Loewner/Geo_FB_Groeger_et-al.pdf (11. Juni 2018).
- GRÖGER, G., KOBLE, T., NAGEL, C., & HÄFELE, K.-H. (2012), opengis. Von 2.0: www.opengis.net/spec/citygml/2.0 (4. April 2012).
- KLEIN, M. (2016), www.egovernment-computing.de/was-ist-ein-kataster-a-588352/. www.egovernment-computing.de/was-ist-ein-kataster-a-588352/ (8. Juni 2018).

- KUTZNER, T., DONAUBAUER, A., MÜLLER, M., FEICHTNER, A., & GOLLER, S. (2014). Erfolgreiche Transformation von Geodaten nach INSPIRE. *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 103-109.
- LÖWNER, M.-O., EGBERT, C., BECKER, T., BENNER, J., GRÖGER, G., GRUBER, U. et al. (2013). Ein internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle Teil2: CityGML in der Praxis. *zfv-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformatik und Landmanagment*, 131-143.
- NICKLIS, I. (2018), lgl-bw. Liegenschaftskataster/#lika_1. www.lgl-bw.de/lgl-internet/opencms/de/05_Geoinformation/Liegenschaftskataster/#lika_1 (9. Juni 2018)
- SAFESOFTWARE. (2018), safe. www.safe.com/ (22. Juni 2018)
- SKETCHUP. (2018), sketchup. www.sketchup.com/de (22. Juni 2018)
- ZIMMERMAN, A. (2012), books.google.de. (H. V. KG, Hrsg.). Basismodelle der Geoinformatik: www.books.google.de/books?id=hKRPAGAAQBAJ&pg=PA279&lpg=PA279&dq=citygml+deklaration&source=bl&ots=kCGvVgE4oK&sig=16R6R48KSxY_UqoWdVLGBJ-z9Cc&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwjRguqU0svbAhVHh6YKHVxNCLIQ6AEIRTAf#v=onepage&q=citygml%20deklaration&f=false (7. Juni 2018)

LaserKit – Ein Framework für effiziente Punktwolkenverarbeitung

Jan Martens

Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme · RWTH Aachen
University · Mies-van-der-Rohe Straße 1 · 52074 Aachen
E-Mail: jan.martens@gia.rwth-aachen.de

Im Zuge der As-Built-Modellierung von Gebäuden ist die Analyse und Verarbeitung von Punktwolken eine essentielle Vorstufe zum Building Information Modeling (BIM). Durch den Einsatz moderner Datenerfassungs- und -auswerteverfahren, wie Time-of-Flight Kameras, terrestrisches Laserscanning oder Structure-from-Motion, ist es möglich, hochaufgelöste Punktwolken mit hoher Genauigkeit und Detailtreue zu erfassen. Die daraus resultierende Notwendigkeit nach effizienten Methoden zur Punktwolkenverarbeitung stellt jedoch eine informationstechnische Herausforderung dar. Mit „LaserKit“ wird ein C++-basiertes Framework präsentiert, welches sich an der bewährten Bildanalysebibliothek „OpenCV“ orientiert, wenige Abhängigkeiten von anderen Softwarebibliotheken hat und durch den Einsatz von Datenstrukturen wie Voxelgittern und Octrees die Punktwolkenanalyse vereinfacht.

Keywords: Punktwolkenverarbeitung, Laserscanning, Kdtree, Octree, Voxel, Visualisierung, Rapid Prototyping

1 Einführung und Konzept

Durch sensorbasierte Verfahren wie Laserscanning sowie Time-of-Flight Kameras (RUSU & COUSINS 2011) und bildbasierte Verfahren wie Structure-from-Motion (REYNOLDS 2012) ist die Erfassung von Punktwolken zuletzt nicht nur komfortabler, sondern auch deutlich kostengünstiger geworden. Das Ableiten von digitalen Bauwerksmodellen aus den erfassten Daten (wie beispielhaft beschrieben in TANG (2010)) ist dadurch in den letzten Jahren zunehmend in den Vordergrund gerückt.

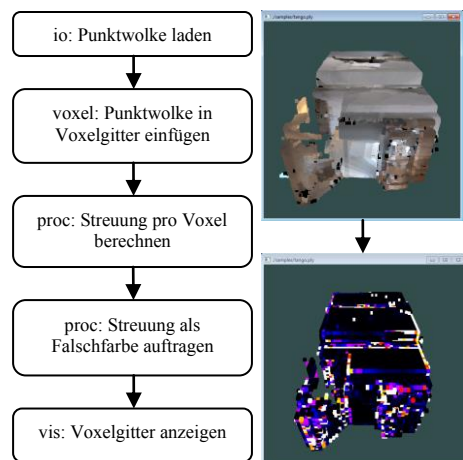


Abb. 1:
Beispielhafter Workflow zum Erstellen und Anzeigen eines eingefärbten Voxelgitters

Das Entwickeln und Erproben von Algorithmen zur Punktwolkenverarbeitung erfordert jedoch in der Regel viel Vorarbeit. Grundvoraussetzung sind Routinen zum Einlesen, Verarbeiten und Exportieren von Punktdaten. Hierfür müssen zahlreiche geometrische Konzepte separat implementiert werden. Methoden zum Visualisieren der Ergebnisse sind zudem empfehlenswert, um den Bearbeitungsvorgang zu beschleunigen. Eine Toolbox mit Datenstrukturen wie Octrees, Kdtrees und Voxelgittern ist ebenfalls vorteilhaft, um Berechnungen effizienter zu gestalten. Bestehende Libraries wie die Point Cloud Library (PCL) (RUSU & COUSINS 2011) bieten zwar eine reichhaltige Auswahl an Algorithmen und Datenstrukturen, allerdings sind sie aufgrund zahlreicher externer Abhängigkeiten kaum zum „Reinschnuppern“ geeignet. Oftmals ist es erforderlich, mehrere, ähnlich komplexe Bibliotheken zu erstellen, ehe die wenigen, für den Nutzer interessanten Funktionen verwendet werden können.

Laserkit versucht diesem Problem entgegenzukommen und verwendet eigene Implementierungen zum Laden, Verarbeiten, Exportieren und Anzeigen von Punktwolken-basierten Daten und Vermaschungen (Meshes). Andere Bibliotheken werden lediglich als optionale Abhängigkeiten eingebunden. Da grundlegende Funktionalitäten wie Filter-, Ladefunktionen und nützliche Datenstrukturen bereits in LaserKit vorimplementiert sind, bieten diese optionalen Bibliotheken lediglich zusätzliche Funktionen, welche im Bedarfsfall in das Framework eingebettet werden können.

Das Leitmotiv von LaserKit ist das Konzept des Rapid Prototypings da es alle zur Verfügung gestellten Hilfsmittel dem Entwickler erlauben, sich auf das Umsetzen eines Konzepts zu konzentrieren. Ähnlich wie in der Bildverarbeitungsbibliothek OpenCV (BRADSKI 2000) lassen sich Schritte, wie das Laden oder Anzeigen von Punktwolken, durch einzelne Codezeilen umsetzen, sodass entstehende Programme kompakt und verständlich strukturiert sind.

2 Modulübersicht

LaserKit besteht aus insgesamt sieben Modulen, von welchen jedes auf andere Aufgaben zugeschnitten ist.

Das *core*-Modul wird durchgängig im gesamten Library verwendet und stellt Datenstrukturen und Typdefinitionen zum Bearbeiten von Punktwolken bereit. Verschiedene Hilfsfunktionen sind ebenfalls enthalten, um den allgemeinen Umgang mit Daten zu erleichtern.

Übliche ASCII-basierte Dateiformate wie XYZ, PTS und CSV lassen sich über das *io*-Modul erstellen und laden. Als optionale Funktion kann darüberhinaus die Open Asset Import Library¹ (Assimp) eingebunden werden, um dem Nutzer mehr Flexibilität zu bieten und weitere Dateitypen zu laden. Klassen zum Kodieren und Dekodieren sind ebenfalls vorhanden um weitere Möglichkeiten zum Lesen und Verarbeiten von Rohdaten zu bieten.

¹ www.assimp.org/

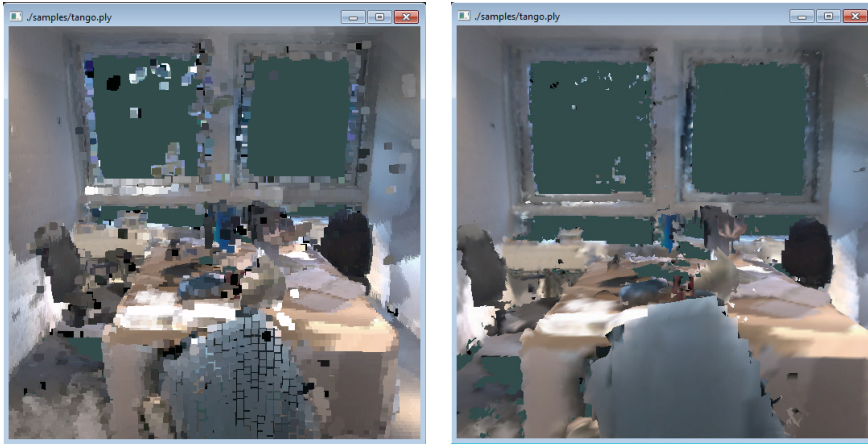


Abb. 2: Darstellung einer Punktwolke im eingebauten Viewer. Es können sowohl reine Punktwolken (links) als auch Meshes (rechts) angezeigt werden. Die Darstellung als Mesh erfolgt dynamisch sofern Dreiecksflächen vorhanden sind.

Algorithmen zum Verarbeiten der geladenen Punktwolken befinden sich im *proc*-Modul. Dieses umfasst eigene Methoden zum Glätten und Filtern von Punktwolken sowie Extrahieren von Features. Grundlegende Filter zum Entrauschen (de-noising) wie Medianfilter werden durch dieses Modul bereitgestellt, gleiches gilt für Normalenberechnungen, Hauptkomponentenanalyse (PCA) und Strukturdeskriptoren, wie sie beispielsweise in BUENO (2017) beschrieben werden. Eigen² kommt hierbei als optionale Abhängigkeit zum Durchführen einiger Operationen zum Einsatz. Zur visuellen Analyse lassen sich diese Methoden wie in Abb. 3 dargestellt mit Falschfarben-Darstellungen kombinieren.

Zusätzlich können das *octree*-Modul, das *kdtree*-Modul oder das *voxel*-Modul eingebunden werden, um die einzelnen Schritte mithilfe eigens implementierter Klassen für Octrees, Kdtrees und Voxelgittern effizienter zu gestalten. Unter anderem lassen sich Nachbarschaftssuchen, Downsampling, Rauschunterdrückung und Schnitte mit diesen Hilfsmitteln einfach und effizient anwenden. Insbesondere die Arbeiten von GIRARDEAU-MONTAUT (2005), TUTTAS (2015), OKORN (2010) und DIAZ-VILARINO (2017) stützen sich stark auf

² www.eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page

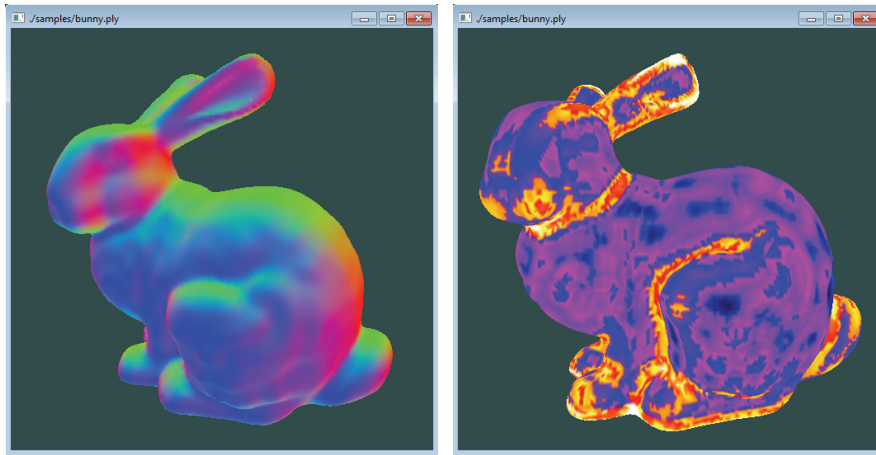


Abb. 3: Farbliche Darstellung von Normalenvektoren (links) und Thermografie-inspirierte Falschfarbendarstellung von Normalen-basierten Gradienten (rechts) im eingebauten Viewer.

diese Datenstrukturen und zeigen praktische Möglichkeiten für deren Einsatz auf. Obwohl die vorgestellten Datenstrukturen intern unterschiedlich aufgebaut sind, verwenden sie ähnliche Programmierschnittstellen (API), sodass es möglich ist, diese je nach Einsatzfall mit wenig Aufwand untereinander auszutauschen. Die dadurch gewonnene Flexibilität kommt dem Nutzer zugute und gewährleistet, dass entwickelte Anwendungen effizient laufen können.

Schlussendlich bietet das *vis*-Modul einen komfortablen Weg, Ergebnisse direkt visuell darzustellen. Der Kern des Moduls basiert auf einem leichtgewichtigen OpenGL-basierten Renderer welcher sowohl Meshes als auch Punktwolken dynamisch darstellen kann (siehe Abb. 2). Durch den eingebauten Windowmanager lassen sich mithilfe einer einzelnen Zeile Fenster zum Anzeigen von Ergebnissen erstellen, was dem Konzept des Rapid Prototyping zugutekommt. Um die Darstellung weiter zu vereinfachen, ist der Windowmanager darüber hinaus in der Lage, automatisch die korrekte Darstellungsform für die Punktwolken zu wählen. Bei Bedarf kann der Benutzer zusätzlich über die Tastatur zwischen verschiedenen Rendermodi wechseln um beispielsweise Meshes durch Punkte darzustellen oder Punktgrößen anzupassen. Obwohl *glm*³ und *Glad*⁴ feste Abhängigkeiten dieses Moduls sind, wurden sie aufgrund ihrer geringen Größe direkt mit *LaserKit* gebündelt. Als verbleibende feste Abhängigkeit bleibt somit *GLFW*⁵, welches intensiv vom internen Windowmanager genutzt wird.

³ www.glm.g-truc.net/

⁴ www.glad.dav1d.de/

⁵ www.glfw.org/

3 Anwendungsbeispiele

Um zu verdeutlichen, wie sich LaserKit für die Punktwolkenverarbeitung einsetzen lässt, werden nachfolgend die Workflows aus Abb. 1 und Abb. 4 beschrieben.

Beide Workflows haben gemein, dass eine erfasste Punktwolke für die Berechnungen von einer der Laderoutinen geladen wird. Der Workflow in Abb. 1 greift anschließend auf ein Voxelgitter zurück, um so lokal die Streuung für Punktnachbarschaften innerhalb der Voxel abzuschätzen. Die Streuungswerte werden anschließend in Falschfarben auf das Voxelgitter aufgetragen, um Kanten farblich hervorzuheben. Das Voxelgitter selbst wird anschließend in ein Mesh konvertiert und so im Viewer angezeigt. Durch diese Methodik ist es schnell möglich, scharfe Objektkanten visuell zu erkennen und einen Überblick über die Geometrie zu erhalten.

Der in Abb. 4 dargestellte Workflow beinhaltet hingegen die Berechnung von Streuungswerten pro Punkt. Da hierfür die punktweise Nachbarschaftsinformation benötigt wird, bietet sich auch hier der Einsatz eines Voxelgitters oder alternativ eines Kd-Trees bzw. Octrees an. Punkte mit hoher Streuung lassen sich im nächsten Schritt herausfiltern um ein Skelett der Punktwolke zu erhalten. Dieses Skelett wird im letzten Schritt als PLY exportiert um es extern weiterzuverarbeiten.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Framework zum Verarbeiten und Visualisieren von Punktwolken vorgestellt.

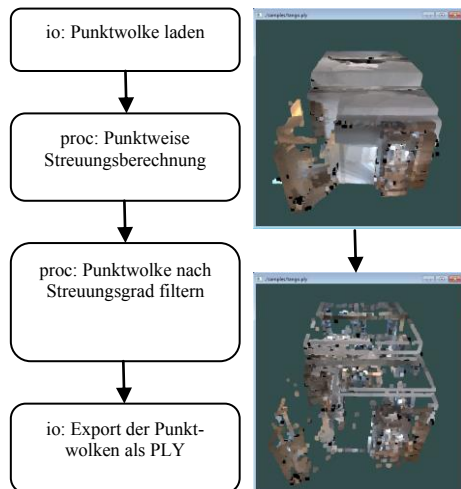


Abb. 4:
Beispielhafter Workflow zum Filtern und Exportieren einer Punktwolke.

Die beinhalteten Methoden und Datenstrukturen wurden mit besonderem Augenmerk auf Geschwindigkeit und Effizienz ausgewählt sowie implementiert. Ergänzend dazu wird eine einfache grafische Oberfläche zum Darstellen von Meshes und Punktwolken geboten. Das Ergebnis ist ein flexibles Framework, welches auf das Erproben von Algorithmen und das schnelle Erstellen von Prototypen ausgelegt ist.

Durch Verwendung des Frameworks in Projekten werden sich mit der Zeit weitere Einsatzmöglichkeiten ergeben, sodass es zukünftig um weitere Funktionen erweitert und effizientere Algorithmen beinhalten wird. Eine Parallelisierung etwa durch das von vielen Compilern unterstützte OPENMP (2018) ist ebenfalls von Interesse, um die Rechenleistung moderner Mehrkernprozessoren voll auszuschöpfen.

Langfristig sollen externe Abhängigkeiten, die bisher bereits optional sind, weitgehend abgebaut werden, sodass Eigen, glm und Assimp vollständig aus dem Framework verschwinden und durch interne Funktionen ersetzt werden. LaserKit sollte somit dem Ziel ein leichtes Framework ohne externe Abhängigkeiten zu sein, zunehmend näherkommen und besonders attraktiv für Rapid Prototyping werden.

Literatur

- BRADSKI, G. (2000), *The OpenCV Library*. Dr. Dobb's Journal of Software Tools.
- BUENO, M. a.-J.-S. (2017), Automatic point cloud coarse registration using geometric keypoint descriptors for indoor scenes. *Automation in Construction*, 134-148.
- DIAZ-VILARINO, L. a. (2017), Indoor modelling from SLAM-based laser scanner: Door detection to envelope reconstruction. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 345-352.
- GIRARDEAU-MONTAUT, D. a. (2005), Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- HANSARD, M. a. (2012), *Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications*. HAL Inria Open Archive.
- OKORN, B. a. (2010), Toward Automated Modeling of Floor Plans. *Proceedings of the Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*.
- OPENMP. (2018), *OpenMP*. OpenMP Application Program Interface: www.openmp.org/
- REYNOLDS, M. W. (2012), *Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. Elsevier.
- RUSU, R. & COUSINS, S. (2011), *3D is here: Point cloud library (PCL)*. IEEE International Conference on Robotics and Automation 2011 (ICRA 2011).
- TANG, P. a. (2010), Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*, 829-843.
- TUTTAS, S. a. (2015), Validation of Bim Components By Photogrammetric Point Clouds for Construction Site Monitoring. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 231-237.

Zur Simulation von faserverstärkten Klebstoffen

Björn Wittor

Professur Stahl- und Hybridbau · Bauhaus-Universität Weimar · Marienstraße 13D · 99423 Weimar ·
E-Mail: bjoern.wittor@uni-weimar.de

Die numerische Abbildung des mechanischen Materialverhaltens faserverstärkter Klebstoffe benötigt die Erfassung unterschiedlicher Eigenschaften des Klebstoffgebundes. Die Klebstoffmatrix und die verwendeten Faserpartikel besitzen in der Regel stark unterschiedliche Eigenschaften, welche in Abhängigkeit der Faserorientierung zu stark anisotropen Materialbeschreibungen führen. Diese Abhängigkeit gilt es zu untersuchen.

Keywords: Materialgesetze, Klebstoff

1 Materialbeschreibungen von Klebstoffen

1.1 Grundlagen

Die numerische Abbildung einer Klebsituation beinhaltet die Definition verschiedener Komponenten, denn die Güte der Ergebnisse hängt von der Qualität des Modells ab. Im Allgemeinen lässt sich das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten mit Hilfe des folgenden Schemas beschreiben (Abbildung 1).

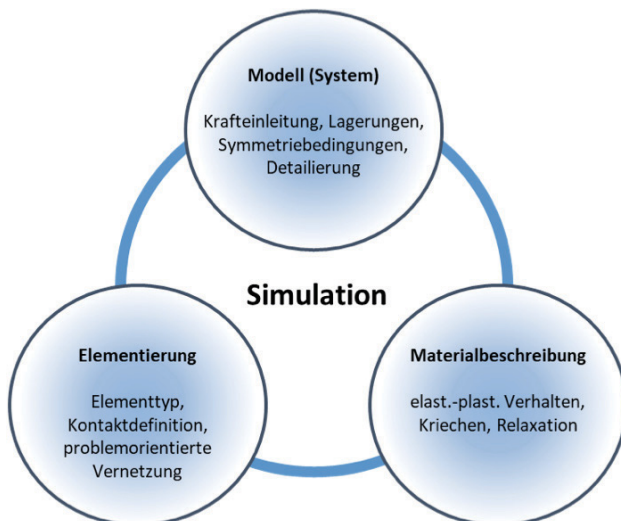


Abb. 1: Einflüsse auf die Qualität einer Simulation.

Durch die große Anzahl verschiedener Klebstoffe (bzw. Kunststoffe) und deren unterschiedlichen Eigenschaften gibt es auch zahlreiche Materialbeschreibungen, welche das Verhalten der Klebstoffe approximieren können. Es können nicht alle physikalischen Eigenschaften in einem einzigen numerischen Modell abgebildet werden, zumal die gezielte Parameterbestimmung entscheidend erschwert wird, je mehr physikalische Phänomene berücksichtigt werden sollen. Daher ist es sinnvoll, mittels experimenteller Untersuchungen die entscheidenden Materialeigenschaften zu identifizieren und quantitativ festzustellen. Somit kann es notwendig und sinnvoll sein, unterschiedliche Belastungsszenarien durch unterschiedliche Materialmodelle zu beschreiben, da beispielsweise der Einfluss von Kriech- und Relaxationsvorgängen bei geringen Belastungsgeschwindigkeiten einen wesentlich größeren Einfluss nimmt als bei Kurzzeitversuchen (BRÖDNER 2012).

1.2 Materialgesetze

Für die Abbildung von verschiedenen Materialeigenschaften gibt es bereits eine große Anzahl an numerischen Beschreibungen, welche mitunter in gängigen FE-Programmen integriert sind. Das Programm ANSYS beinhaltet beispielsweise 13 verschiedene mathematische Formulierungen zur Abbildung des Kriechverhaltens eines Materials.

Im Allgemeinen setzen sich die unterschiedlichen Materialgesetze aus wenigen rheologischen Grundelementen zusammen (NASDALA 2015):

- das Hooke-Element zur Beschreibung der elastischen Verformungsanteile,
- das Newton-Element zur Beschreibung von viskosem Materialverhalten,
- das Coulomb-Element bzw. St.-Venant-Element zur Abbildung der plastischen Verformung,
- sowie das erweiterte Hook-Element zur Erfassung der Schädigung infolge maximaler Belastung und Lastspielzahl.

Da sich die Verformungsreaktion eines Körpers nicht ausschließlich mit einem der vier Grundelemente beschreiben lässt, werden Materialmodelle durch die Kombination dieser Elemente entwickelt.

2 Einflüsse der Faserorientierung

2.1 Problemstellung

Im speziellen Fall der faserverstärkten Klebstoffe ist die Abbildung der Materialeigenschaften anspruchsvoll, da die Interaktionsbeziehungen zwischen der Klebstoffmatrix und dem Faserzuschlag erfasst und berücksichtigt werden müssen. Das Einbringen von Faserstoffen in die Kunststoffmatrix dient in der Regel der Vergrößerung der Steifigkeiten der Klebstoffe. Da die Fasern aber nur bei einer Orientierung in Richtung des Kraftflusses ihre volle Kapazität entfalten können, ergeben sich bei einer ungerichteten Ausbreitung der Faserpartikel stark schwankende Materialeigenschaften. Wie Abbildung 2 zeigt, wird diese Abhängigkeit bereits von Bergmeister für faserverstärkte Kunststoffe qualitativ erfasst (BERGMEISTER, K. 2003). Die entsprechenden Zugfestigkeiten des Materials liegen hier in etwa zwischen 12 % und 95 %. Es wird deutlich, dass bei einer Änderung der Faserausrichtung von 30 ° die Zugfestigkeit des Kunststoffes bereits auf unter 50 % sinkt und sich bei

Faserausrichtungen über 60° nur noch geringe Festigkeitsänderungen unterhalb von 15% ergeben.

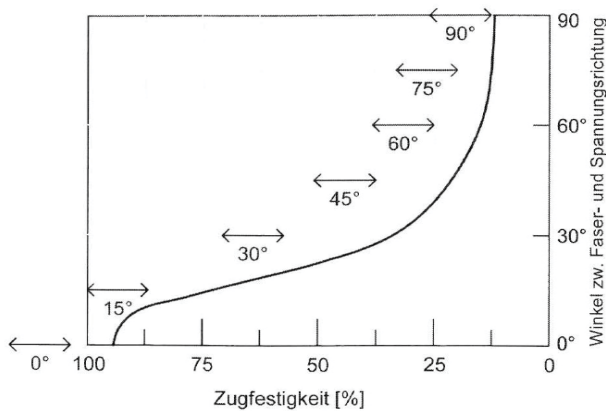


Abb. 2: Zugfestigkeit von faserverstärkten Kunststoffen in Abhängigkeit der Faserorientierung (BERGMEISTER, K. 2003).

2.2 Numerische Umsetzung

Der Einfluss der Faserorientierung lässt sich auf faserverstärkte Klebstoffe übertragen, um ein geeignetes Materialmodell zu entwickeln. Für die Untersuchung wird von einem Faseranteil von etwa 3,5 % ausgegangen. Die Orientierung der einzelnen Fasern ist stark von der Art der Applikation, Größe der Klebefläche und Schichtdicke abhängig. Im Folgenden wird von einer gleichmäßigen Faserverteilung ausgegangen.

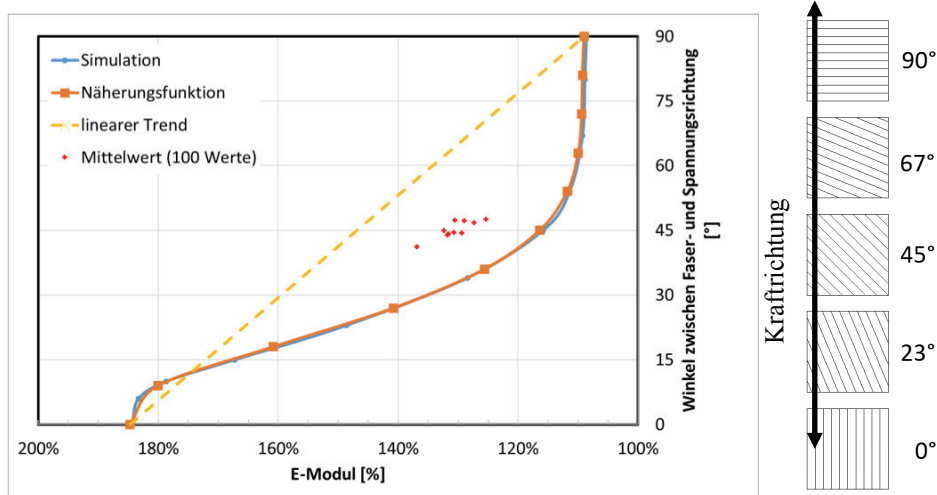


Abb. 3: Numerisch bestimmtes E-Modul für verschiedene Faserneigungen.

Abbildung 3 zeigt den Einfluss dieser Faserorientierung auf den E-Modul eines faserverstärkten Klebstoffes (Faseranteil 3,5 %). Bei optimaler Faserausrichtung von 90° steigt die Steifigkeit des Klebstoffes um 85 %. Da bei der Herstellung des Materials von einer homogenen Faserverteilung ausgegangen wird, ergibt sich eine mittlere Faserausrichtung von etwa 45° und eine durchschnittliche Erhöhung des E-Moduls von etwa 30 % (Abb. 2 - rote Mittelwerte). Ein Körper mit einer gleichbleibenden Faserorientierung von 45° würde nur zu einer 15 %-igen Steigerung der Steifigkeit führen. Durch eine gleichmäßige Streuung der Fasern werden aber höhere Steifigkeiten erreicht, da die Hälfte der Fasern unter 45° Faserwinkel einen wesentlich größeren positiven Einfluss haben als die Fasern mit höheren Faserwinkeln. Dies liegt an der nichtlinearen Abhängigkeit zwischen Faserorientierung und E-Modul (Abb. 2 - Näherungsfunktion).

Für die Bestimmung der in Abbildung 3 dargestellten Zusammenhänge bzgl. der Materialsteifigkeit werden im Rahmen von FE-Simulationen 11 verschiedene Materialien mit unterschiedlichen Faserorientierungen und dem dazugehörigen E-Modul modelliert und zu gleichen Anteilen zufällig über ein Volumenmodell verteilt. Durch die Simulation einer gleichmäßigen Belastung des Körpers wird die Erhöhung der Steifigkeit um etwa 30 % bestätigt. Abbildung 4 zeigt einen Querschnitt des Modells (senkrecht zur Krafrichtung) mit der Verteilung der Normalspannungen bei Belastung, die aufgrund der unterschiedlichen lokalen Steifigkeitsverhältnisse stark variieren.

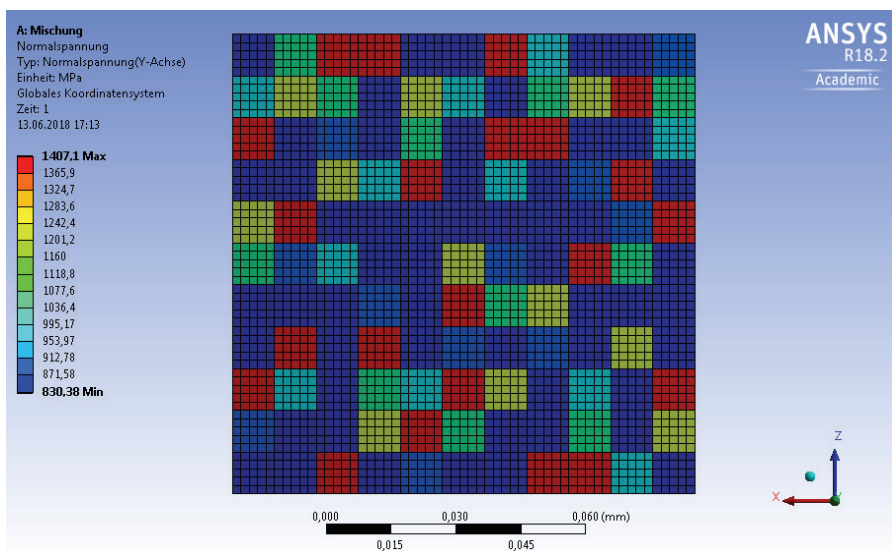


Abb. 4: Verteilung der Normalspannung im Querschnitt des FE-Modells.

Die faserverstärkten Klebstoffe werden in der Regel als Dickschichtklebungen eingesetzt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich nicht nur eine Verteilung bzw. Ausrichtung der Fasern in einer Ebene ergibt, sondern eine räumliche Verteilung der Fasern einstellt. Der Einfluss einer solchen räumlichen Faserverteilung auf die Steifigkeit wurde an einem numerischen Modell mit etwa 3 % Faseranteil abgebildet. Abbildung 5 zeigt drei Körper mit einem annähernd gleichen Faseranteil, jedoch unterschiedlichen Faserorientie-

rungen. Für den ersten Körper wird davon ausgegangen, dass 100 % der Fasern in Richtung der y-Achse orientiert sind. Bei Körper 2 werden jeweils 50 % der Fasern in Richtung der x- und y-Achse ausgerichtet und entsprechend bei Körper 3 jeweils 33 % in Richtung der Achsen x, y und z. Bei einer Belastung des Körpers ergeben sich stark unterschiedliche Steifigkeiten, die in Abbildung 5 prozentual angegeben sind und sich auf den im Bild links dargestellten Referenzkörper ohne Fasern beziehen. Wie zu erwarten, liefert der Würfel mit einer einachsigen Faserorientierung in Kraftrichtung mit 170 % den größten Anstieg der Materialsteifigkeit.

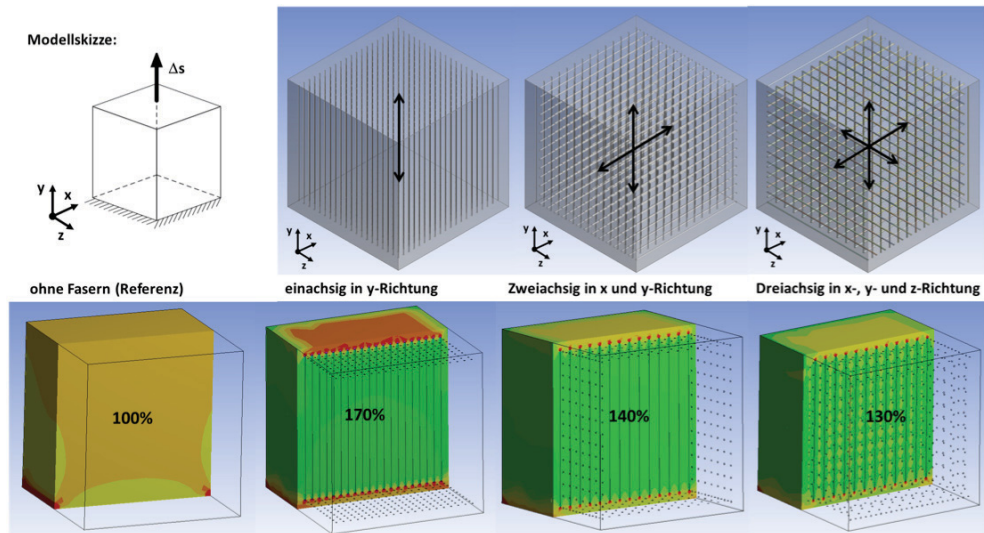


Abb. 5: Prozentuale Steifigkeitsveränderung eines Volumenmodells mit gleichem Faseranteil und unterschiedlicher Faserorientierung im Vergleich zum unverstärkten Klebstoff (Farbverlauf entspricht der qualitativen Normalspannungsverteilung).

Die Faserausrichtung weist aufgrund des Herstellungsprozesses eine starke Anisotropie auf. Bei der mathematischen Betrachtung wird von einer homogenen Verteilung der Fasern in alle Raumrichtungen ausgegangen. Das heißt, dass die Faserausrichtung nicht direkt in Richtung der Hauptachsen verläuft, sondern sich frei im Raum einstellen kann. Zur Beschreibung der verschiedenen räumlichen Orientierungen, die die Fasern einnehmen können, werden gleichmäßig verteilte Punkte auf einer Kugelschale generiert und mit dem Koordinatenursprung ein Vektor gebildet. Von diesem Vektor werden die räumlichen Winkel zu den 3 Hauptachsen berechnet und gegenübergestellt (φ_x , φ_y , φ_z) (Abbildung 6).

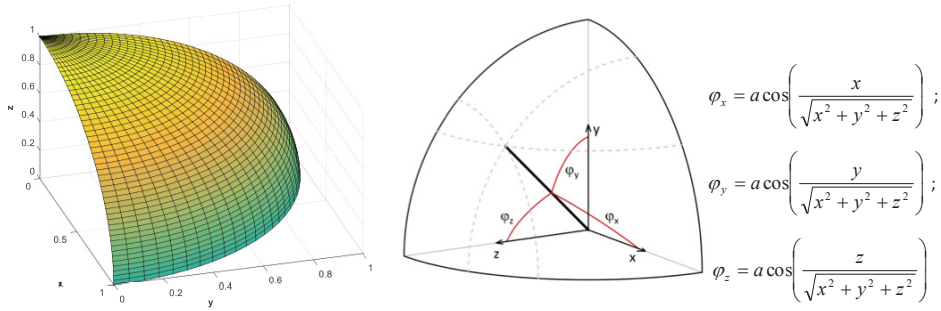


Abb. 6: Bestimmung der Faserwinkel zu den drei Raumachsen (Formeln: PAPULA, LOTHAR 2014).

Diese Vorgehensweise liefert eine Beschreibung der Faserwinkel in Abhängigkeit der Hauptachsen, was in Abbildung 7 dargestellt ist. Die Winkel liegen, wie zu erwarten, jeweils zwischen 0 ° und 90 °. Bei der Bestimmung des mittleren Raumwinkels zu den jeweiligen Achsen ergibt sich hier ein Winkel von etwa 57 °. Wenn jedem der Punkte eine Steifigkeit entsprechend Abbildung 3 zuordnet wird, ergibt sich eine mittlere Steifigkeit von etwa 121 % (gegenüber einer Steifigkeit ohne Faserzusatz). Wie bereits dargestellt liegt die mögliche Materialsteifigkeit für einen faserverstärkten Klebstoff mit 3,5 % Faseranteil bei maximal 185 %, sofern sämtliche Fasern in Krafrichtung ausgerichtet sind. Somit entspricht die Erhöhung der Materialsteifigkeit bei gleichmäßig verteilter räumlicher Faserorientierung bei nur etwa 25 % der theoretisch möglichen Kapazität.

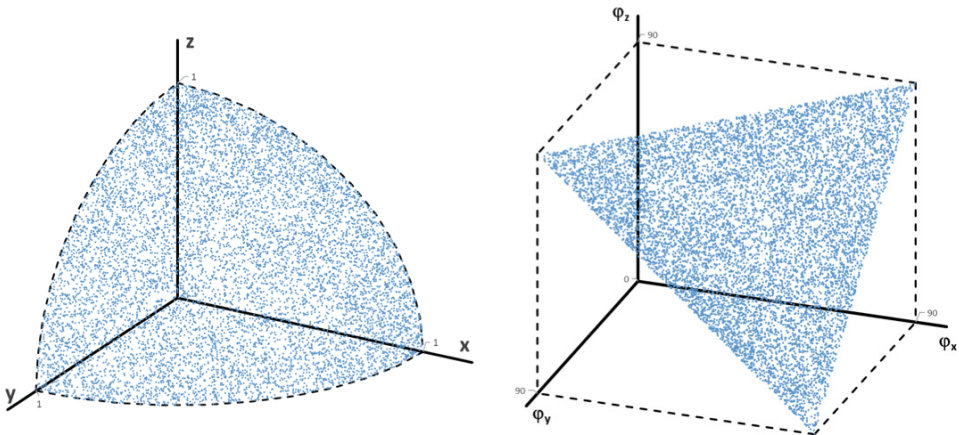


Abb. 7: Homogene Verteilung der Punkte auf der Kugeloberfläche (links) und die zugehörigen Raumwinkel (rechts).

2.3 Fazit

Die mathematischen Modelle für die Abbildung des Materialverhaltens von Kunststoffen sind recht umfangreich und geben die Möglichkeit zur Abbildung des Langzeit- und Kurzzeitverhaltens. Jedoch lassen sich diese Modelle nur bedingt auf Mehrkomponentensysteme anwenden. Speziell die Modifikation mit Hilfe von Faserstoffen, kann die Materialeigenschaften in umfangreichen Maße beeinflussen. Dies bedingt eine genauere Untersuchung, in wieweit die Fasern allein durch ihre Positionierung Einfluss auf die Materialeigenschaften nehmen. In der vorliegenden Ausarbeitung wird der Einfluss auf die Steifigkeit in einer Raumrichtung dargestellt. Es zeigt sich, dass durch eine homogene Faserverteilung bei einaxialer Belastung ein großer Teil der Kapazität einer Faserverstärkung verloren geht. Für die Betrachtung eines mehrachsigen Spannungszustande können sich jedoch wesentlich günstigere Eigenschaften ergeben.

Literatur

- ANSYS INC. (2015). ANSYS: Mechanical APDL Theory Reference: SAS IP, Inc.
- BRÖDNER (2012). Gummidichtungen in der Hydraulik: Grundlegendes & Möglichkeiten der FE-Simulation.
- NASDALA, LUTZ (2015). FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik: Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks. 3., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online im Internet: URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-06630-7>.
- BERGMEISTER, K. (2003). Kohlenstofffasern im Konstruktiven Ingenieurbau, Ernst & Sohn Berlin
- PAPULA, LOTHAR (2014). Mathematische Formelsammlung - Für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Springer Vieweg. Wiesbaden

Anwendung visueller Programmiersprachen bei der Steuerung von virtuellen Fertigungsrobotern

Christian Schadow¹ und Daniel Luckey²

Fachgebiet Bauinformatik · Universität Kassel · Mönchebergstraße 7 · 34109 Kassel

¹E-Mail: schadow@uni-kassel.de · ²E-Mail: daniel-luckey@student.uni-kassel.de

Die raschen Entwicklungen im IT-Bereich eröffnen neue Möglichkeiten die Bauplanung und -ausführung effizienter zu gestalten. Sie legen die Grundlage für zukünftiges, bisher unerreichbares Innovationspotenzial.

Um die Generierung und das Bearbeiten der digitalen Bauwerksmodelle im CAD-Bereich effizienter zu gestalten, wurden in einigen Modellierungswerkzeugen Visuelle Programmiersprachen (VPS) eingeführt. Diese erlauben es, optisch Algorithmen zu erstellen, mit denen auch komplizierte Bauwerksmodelle schnell erstellt oder geändert werden können. Daher sind diese VPS auch von Planern ohne oder nur mit geringen Programmierkenntnissen leicht erlernbar und anwendbar.

Außerdem bieten einige Hersteller im Bereich der Robotik Schnittstellen zwischen virtuellen Robotern und CAD-Programmen. Eine VPS kann hierbei diese Schnittstelle anreichern und mehrere Möglichkeiten für die Untersuchung einer modellbasierten Robotersteuerung in der Planungsphase eröffnen.

In diesem Paper werden auszugsweise vorhandene Schnittstellen zur Steuerung von Robotern im virtuellen Raum mithilfe von VPS vorgestellt, wobei BIM-Daten als Informationsquelle für die Roboterfertigung dienen sollen. Eine solche virtuelle Machbarkeitsanalyse in der Planungsphase kann Planern helfen, Entscheidungen über den Einsatz sowie die Auswahl von Fertigungsrobotern zu treffen.

Zur Veranschaulichung der Anwendungsmöglichkeiten wird exemplarisch das robotergetriebene Setzen einer Mauerwerkswand vorgestellt. Weiterhin wird ein Ausblick über den minimal erforderlichen Datengehalt sowie über die Bauweisen, Materialien und Bauteilarten gegeben, bei denen erfolgversprechendes Einsatzpotenzial für diese Methode vermutet wird.

Keywords: Automatisierung, Robotik, Visuelle Programmierung

1 Visuelle Programmiersprachen (VPS)

Bisherige Anwendungsgebiete von VPS im Bauwesen sind insbesondere das Generieren von Modellen sowie das Überprüfen von Modellinformationen (Ritter et al. 2015). Die in den letzten Jahren entwickelten Schnittstellen zur Robotersteuerung für grafische Programmieroberflächen eröffnen neue Möglichkeiten für die Digitalisierung der Bauausführung.

1.1 Grundlagen

Der Einsatz von VPS ermöglicht dem Benutzer die Erstellung komplexer Algorithmen und Programmabläufe ohne Kenntnis über die dem Programm zugrunde liegende Programmiersprache oder anderweitigem Vorwissen über Programmierung. Die VPS macht dies möglich, indem verschiedene vordefinierte grafische Blöcke, die den Programm- bzw. Funktionscode beinhalten, miteinander über Drähte verbunden werden können. Der Programmcode ist dabei für den Benutzer nicht sichtbar und verbirgt sich hinter der Bezeichnung bzw. der Funktionsbeschreibung des dargestellten Codeblocks. Jeder Block gibt dem Verwender weiterhin an, welche In- und Output-Verbindungen zur Ausführung des Blocks vorhanden sein müssen sowie die bei der Verbindung zulässigen Datentypen. Neben der besonders für Einsteiger hilfreichen visuellen Darstellung und Strukturierung von Programminhalten und -abläufen bieten die VPS zudem die Möglichkeit individuell erzeugten Programmcode einzubinden und umzusetzen.

Mithilfe der VPS können sowohl Modelle von Bauwerken konstruiert als auch bestehende Modelle verändert werden. Komplexe Formen und Strukturen können automatisch vom Computer generiert und angepasst werden. Durch direkten Import von Messpunkten können Bauwerksmodelle erstellt und existierende Modelle analysiert werden. Weiterhin bieten VPS dem Nutzer die Möglichkeit, durch einfache Änderungen Variantenvergleiche von komplexen Modellen leicht durchzuführen. In diesem Beitrag werden nachfolgend die VPS „Dynamo“ und „Grasshopper“ vorgestellt sowie deren Anwendungsmöglichkeiten bei dem Robotik-Einsatz in der Baufertigung aufgezeigt.

1.2 Dynamo für Revit und Grasshopper für Rhino3d

Die visuellen Programmieroberflächen Dynamo und Grasshopper sind kostenfreie Plug-Ins für die jeweiligen kostenpflichtigen CAD-Programme „Revit“ und „Rhino3d“.

Bei Dynamo handelt es sich um eine von „Autodesk“ zur Verfügung gestellte Open-Source-Plattform für die VPS. Dynamo profitiert dabei von der BIM-Fähigkeit Revits. Weiterhin ist Dynamo auch als Stand-alone-Version in Form von „Dynamo Studio“ verfügbar, wobei in dieser Form nicht direkt auf ein in Revit geladenes Bauwerksmodell zugegriffen werden kann.

Grasshopper hingegen ist, wie das zugrunde liegende Programm Rhino3d der Firma „Robert McNeel & Associates“, von Haus aus nicht BIM-fähig. Die unterschiedliche BIM-Fähigkeit der Programme ist ein wesentlicher Unterschied zwischen Revit und Rhino. Da Rhino primär eine reine Design- und Entwurfssoftware ist, die nicht vorrangig für das Bauwesen entwickelt wurde, wird der IFC-konforme Einsatz in diesem Bereich nur über zusätzliche kostenpflichtige Erweiterungen wie „GeometryGym“ und „VisualARQ“ möglich (Hausknecht 2016, 81 f.). Die vorhandenen Stärken von Rhino und Grasshopper bei der Modellierung und der großen Anzahl an verfügbaren wertvollen Plugins können sich hier nicht unmittelbar positiv auswirken, da es sich bei diesem Anwendungsfall vorrangig um die einfache Erstellung und Verifizierung der Bewegungssequenzen des Roboterarms basierend auf digitalen Bauwerksdaten handelt.

Weitere spracheninhärente Diskrepanzen zeigen sich im Umfang der integrierten Code-Blöcke sowie deren Verbindungsmöglichkeiten und Funktionsweisen. In Abbildung 1 wird

beispielhaft dargestellt, wie unterschiedlich beide VPS das Runden einer Dezimalzahl umsetzen.

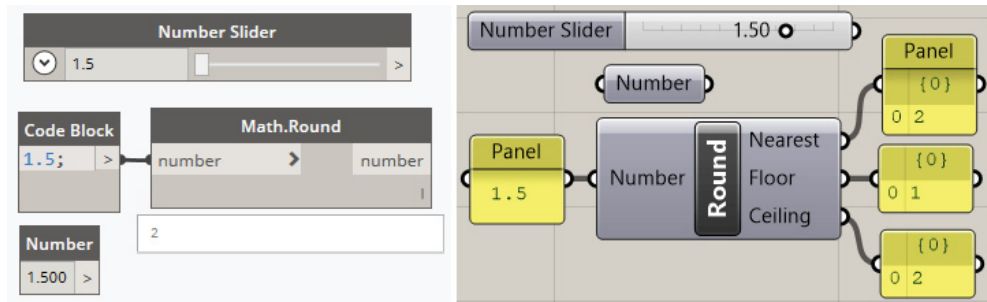


Abb. 1: Vergleich des Code-Blocks „Runden“ in Dynamo (links) und Grasshopper (rechts)

Der Funktionsbaustein aus Dynamo rundet die Zahl 1,5 auf die nächstliegende Ganzzahl. Dabei kann der Block, der die Funktion ausführt, gleichzeitig auch das errechnete Ergebnis anzeigen. Die In- sowie Output-Parameter geben sofort erkennbar vor, welche Datentypen und Verbindungen an der jeweiligen Stelle zulässig sind. Die Eingabe der Zahl kann über verschiedene Blöcke erfolgen.

Im Vergleich zu Dynamo befindet sich auf der rechten Seite der Abbildung der äquivalente Block in Grasshopper. Erkennbar ist, dass der entsprechende Block bei dieser VPS drei verschiedene „Runden“-Funktionen gleichzeitig erfüllt, bei Dynamo hingegen nur eine.

Beide VPS sind sich in Funktionsumfang und -aufbau ähnlich, doch soll das vergleichende Beispiel die vorhandenen Unterschiede aufzeigen. Derartige Abweichungen sind ebenfalls in den für beide VPS entwickelten, vergleichbaren Schnittstellen zur Robotersteuerung festzustellen.

1.3 VPS Schnittstellen zur Robotersteuerung

Für die beiden vorgestellten VPS existieren Programmschnittstellen, mit deren Hilfe virtuelle Roboter gesteuert sowie Bewegungsanweisungen für reale Roboter erstellt werden können. Der in Österreich ansässige Verein „Robots in Architecture“ hat für KUKA-Industrieroboter die „KUKA parametric robot control“ entwickelt. „KUKAprc“ ist sowohl kostenpflichtig in vollem Umfang als auch kostenfrei in einer Version, die weniger Funktionen beinhaltet, neben Grasshopper ebenfalls für Dynamo verfügbar (Braumann & Brell-Cokcan 2011, Braumann 2017).

Durch die Schnittstelle sind den Programmen verschiedene Robotermodelle gegeben, die je nach notwendiger Größe und nötigen Bewegungsmöglichkeiten für den Arbeitsvorgang gewählt werden können. Die auszuführenden Bewegungen des Roboters können mithilfe der Daten des 3D-Modells generiert, verknüpft und ausgeführt werden. Neben den vorgegebenen Bewegungen des Roboters bietet die Schnittstelle in beiden Programmen die Möglichkeit, weitere Roboter-Befehle über die KUKA-Roboterprogrammiersprache „KUKA Robot Language“ einzupflegen. Generell können mehrere durchzuführende Befehle nacheinander ausgeführt und somit komplexe Bewegungsabläufe modelliert werden.

In der Abbildung 2 ist der minimal erforderliche Funktionsumfang zur Darstellung einer einfachen Roboterbewegung für Dynamo abgebildet.

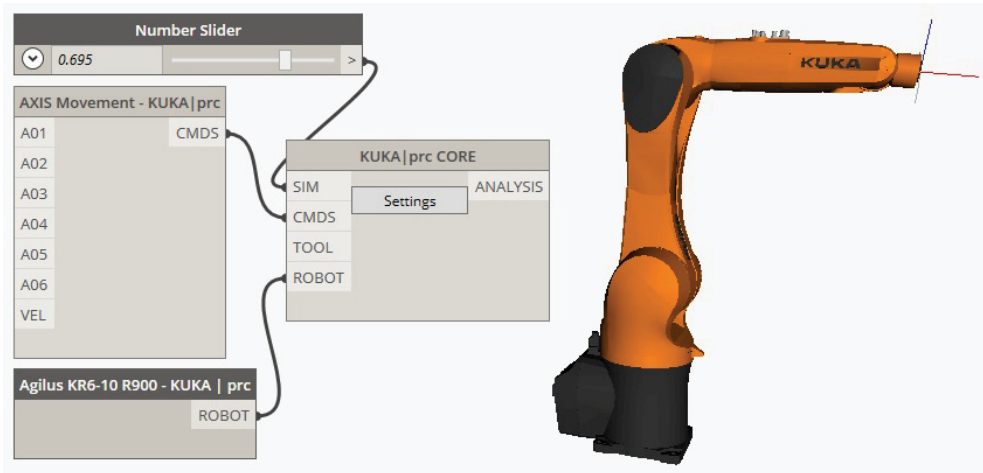


Abb. 2: Einfaches Beispiel zur Umsetzung der Robotersteuerung in Dynamo

Der Aufbau ist für beide VPS beinahe identisch. Zentrales Element der Roboter-Schnittstelle ist der „Core“-Baustein, der die Informationen über den Roboter (ROBOT), dessen optional verwendete Werkzeuge (TOOL), die durchzuführenden Bewegungen (CMDS) sowie den Ablauf der Simulation (SIM) enthält. Die Simulation kann dabei über eine manuelle Veränderung des Zahlenreglers oder über eine automatisch ablaufende „Auto-Play“-Option erfolgen. Als Bewegung ist eine Fahrt entlang einer vordefinierte Roboterachse verbunden, die über die verschiedenen Input-Parameter dem gewünschten Ablauf angepasst werden kann. Des Weiteren wird aus der vorgegebenen Roboterbibliothek ein dem Anwendungszweck angemessener Roboter gewählt.

Die Simulation der modellierten Bewegungsabläufe ist in den verwendeten Programmen direkt durchführbar und ermöglicht somit eine unmittelbare Analyse. Werden beispielsweise Code-Blöcke nicht funktionsgemäß verknüpft, beschreiben die Fehler-Zeiger der VPS direkt den aufgetretenen Verbindungsfehler. Zusätzlich zeigt der Roboter Bewegungen, die seinerseits aufgrund der Abmessungen oder Geometrie nicht möglich sind, auf, indem der betroffene Bereich des Roboters während der Simulation gekennzeichnet wird. Dadurch ist dem Nutzer sofort ersichtlich, welche Abläufe oder Parameter verändert werden müssen, um eine etwaige reale Umsetzung der Bewegungen zu ermöglichen.

Diese Art der Roboterprogrammierung ohne real vorhandenen Roboter wird als „Offline“-Programmierung bezeichnet. Dabei können zukünftige Produktionsprozesse ohne Unterbrechung der Fertigung oder des Robotereinsatzes vorbereitet werden (Weber 2009, 111 ff.). Somit bereitet die während der Planung verfügbare Überprüfung der Machbarkeit des geplanten Vorhabens kontinuierlich den späteren Geräteeinsatz vor.

2 Exemplarisches Einsatzbeispiel

Als exemplarische Einsatzmöglichkeit der Robotersteuerung durch VPS soll das Herstellen einer Mauerwerkswand aus einzelnen Steinen dargestellt werden. Auf Grundlage des erstellten visuellen Algorithmus nimmt ein Roboter dabei die zur Verfügung stehenden Steine von einem in seiner Umgebung platzierten Vorratsstapel auf und platziert diese nacheinander, um so die modellierte Wand zu bauen.

2.1 Erstellen einer Mauerwerkswand

Für das Einsatzbeispiel wurde das Dynamo-Plugin für Revit ausgewählt. Aufgrund der BIM-Fähigkeit von Revit kann auch aus dem Dynamo-Plugin direkt auf Bauwerkselemente zugegriffen werden. Ausgehend von einem Bauwerksmodell, das beliebige Wände beinhalten kann, wird dem Algorithmus zu Beginn einmalig mitgeteilt, welcher für den Aufbau durch den Roboter relevante Wandtyp (Wandaufbau und Material) aus dem Bauwerksmodell extrahiert werden soll. Anschließend ermittelt er für die entsprechenden Wände deren Abmessungen und daraus mithilfe eines vorgegebenen Steinformats die Steinanzahl innerhalb der Wand. Wandöffnungen werden bisher nicht berücksichtigt, und bei der Steinanzahl wird auf das ganze Vielfache abgerundet. Darauf aufbauend wird die Steinanordnung bei diesem Beispiel im Läuferverband generiert. Sobald die Position jedes Steins festgelegt ist, kann damit begonnen werden, die für die Herstellung der Wand erforderlichen Bewegungssequenzen des Roboterarms zu generieren. Dabei werden die Mittelpunkte der oberen Steinoberfläche sowie die Steinausrichtung verwendet. Abschließend werden die erstellten Bewegungssequenzen an die Robotersteuerung übergeben, mit deren Hilfe dann eine Simulation des Herstellprozesses ausgeführt werden kann. Der entwickelte Algorithmus ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

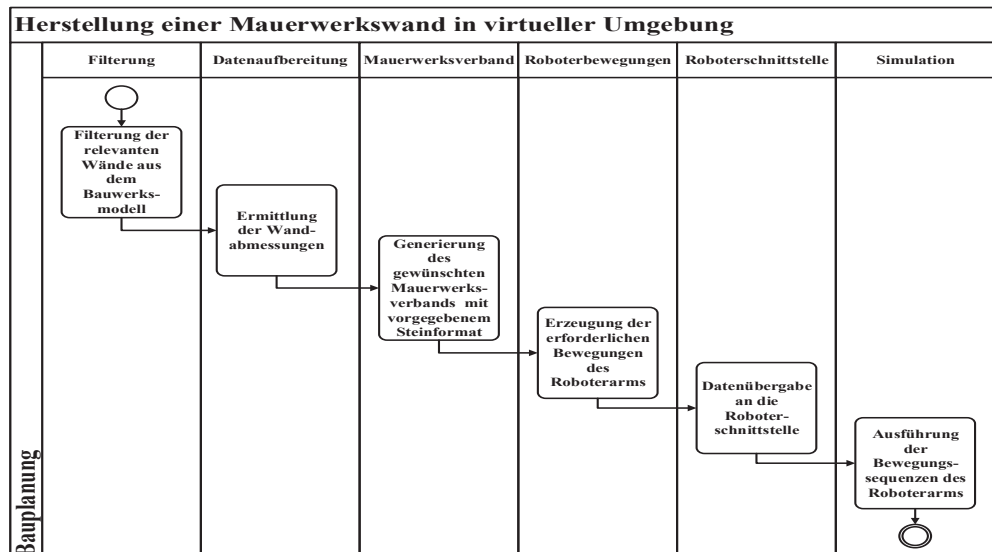


Abb. 3: Schematische Darstellung des entwickelten Algorithmus

Die Filterung der relevanten Wände aus dem Bauwerksmodell ist exemplarisch in Abbildung 4 dargestellt. Für einen vorgegebenen Wandtyp werden alle Instanzen dieses Typs aus dem Bauwerksmodell ermittelt. Mithilfe des Blocks „Element.Parameters“ wurden die im Bauwerksmodell vorhandenen Daten der ermittelten Wände beispielhaft visualisiert.

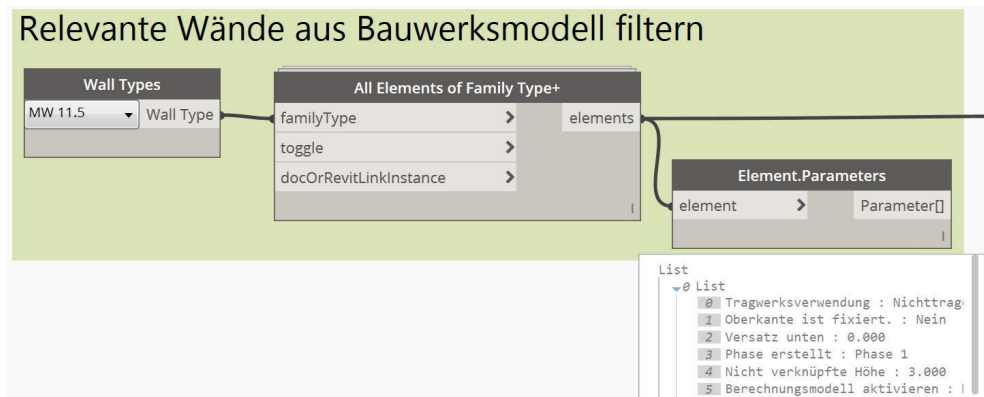


Abb. 4: Filterung der relevanten Wände aus dem Bauwerksmodell

Da der Roboterfuß bisher nicht beweglich ist, sondern einen fest definierten Standpunkt im Modell-Koordinatensystem benötigt, muss in diesem Fall eine Annahme getroffen werden. Die Wände werden nicht von einem mobilen Roboter in-situ erstellt, sondern stattdessen beispielsweise als Fertigteile durch einen stationären Roboter gefertigt. Aufgrund dessen werden die selektierten Wände mithilfe der entnommenen geometrischen Angaben virtuell in Reichweite des Roboters errichtet, um diese erreichbar zu machen. Der Algorithmus wählt bei vorheriger Eingabe der maximalen Wandabmessungen weiterhin nur die Wände aus, die für das gewählte Maschinenmodell erreichbar sind. Abbildung 5 zeigt die exemplarisch mit der Robotersteuerung für Dynamo simulierte Wand.

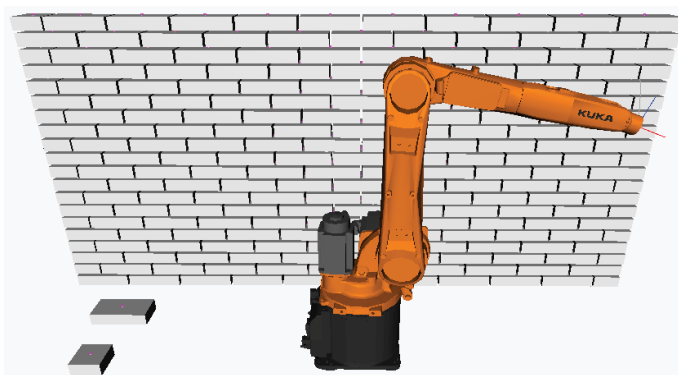


Abb. 5: Einsatzbeispiel robotergestützter Fertigung einer Mauerwerkswand

Bei der Simulation des Herstellprozesses werden die erzeugten Bewegungssequenzen verifiziert. So werden z. B. Kollisionen und für den Roboterarm nicht ausführbare Bewegungen registriert und für die spätere Korrektur gespeichert.

2.2 Benötigter Datengehalt

Der erforderliche Datengehalt der Modelle beschränkt sich für das beschriebene Vorgehen auf wenige, zur Erstellung des Bauwerksmodells ohnehin notwendige, geometrische und nichtgeometrische Informationen (Abmessungen und Lage der Wand, Wandaufbau, Material). In Bezug zu dem zuvor beschriebenen Beispiel der Mauerwerkswand muss für das geplante Projekt im Algorithmus der zu selektierende Wandtyp (Wandaufbau, Material) festgelegt werden. Zudem werden die geometrischen Abmessungen der Wand abgefragt und daraus der gewünschte Mauerwerksverband generiert. Dafür wird das zu verwendende Steinformat benötigt, das nicht aus dem Bauwerksmodell entnommen werden kann. Für die Generierung der Bewegungssequenzen werden weitere Angaben zur Position des Steinlagers sowie der gewählten Position des Roboterarms benötigt. Ferner wird für die Simulation der Bewegungssequenzen das gewünschte Robotermodell, das aus den verfügbaren Robotertypen ausgewählt werden kann, sowie dessen Position benötigt.

3 Fazit und Ausblick

Visuelle Programmiersprachen bieten besonders für Anwender ohne umfangreiche Programmierkenntnisse die Möglichkeit, komplexe Algorithmen und Programmfunktionen zu modellieren. Ohne programmierbezogene Vorkenntnisse kann der Nutzer durch das „Drag-und-Drop“-Verfahren Verbindungen von vordefinierten Code-Blöcken erzeugen und somit komplizierte Formen und Funktionen erstellen bzw. erstellen lassen. Der visuelle, direkt ersichtliche Aufbau der Beziehungen und Verknüpfungen ermöglicht unmittelbares Feedback zu fehlerhaften, nicht funktionsgemäßen Verknüpfungen und potenziellen Lösungen. Durch diese Aufbereitung wird anschaulich ein Verständnis für die Verwendung unterschiedlicher Datentypen und den strukturellen Aufbau von Algorithmen aufgebaut und vermittelt. Die Verfügbarkeit von Schnittstellen zwischen VPS und Robotersteuerung bietet die Möglichkeit, die Vorteile der VPS zu nutzen und damit die Einsatzanalyse von Robotern für die Baufertigung zu unterstützen. Damit kann der Einsatz von Robotik bei der Bauausführung schon während einer frühen Planungsphase untersucht, bewertet und optimiert werden. Dies ermöglicht fundierte Entscheidungen zum Einsatz von Robotik mit reduziertem Risiko. Wenn die vorhandene Möglichkeit der Simulation ausgenutzt wird, kann das gesamte Projektrisiko weiterhin reduziert werden.

Mögliche Einsatzgebiete derartiger Fertigungsmöglichkeiten finden sich, wie im vorhergehenden Beispiel beschrieben, bei der Herstellung von Bauteilen, die aus bekannten Steinformaten und Materialien bestehen. Durch bereits verbreitete Werkzeuge in der industriellen Produktion, wie Vakuum-Sauger oder Gripper, können Steine jeglicher Größe und Abmessungen verwendet werden. Limitierende Faktoren sind dabei die Abmessungen des verwendeten Roboters sowie die erlaubte Traglast. Zudem sind Verfahren, die das Drucken von Beton beinhalten, realisierbar und werden teilweise in Vorgängen, ähnlich zu denen eines 3D-Druckers, bereits angewendet (Bock & Linner 2016, 77 ff.).

Neben den verschiedenen Einsatzgebieten kann die potenzielle Steigerung der Wirtschaftlichkeit die Einsatzchancen der robotergestützten Fertigung verbessern. Das automatisierte Vorgehen des Algorithmus erlaubt es ebenfalls, standardisierte Formen vorzufertigen. Die Herstellung von individuell geformten Bauteilen ist ohne kostenintensive Pausen und tief-

gehende Eingriffe in die Produktionsabläufe umsetzbar. Des Weiteren würde ein mobiler Roboter die Möglichkeit bieten, verschiedene Bauteile in-situ herstellen zu können. Einsparungsmöglichkeiten bieten sich trotz der hohen Investitionskosten dabei insbesondere durch den Abbau von personalkostenintensiven Vorgängen sowie sinkendes Unfallpotenzial auf der Baustelle. Zudem kann der Roboter unabhängig von üblichen Arbeitszeiten in den BIM-Workflow integriert werden.

Kritisch anzumerken ist, dass die vorhandenen Schnittstellen zur Robotersteuerung bisher herstellerspezifisch sind und damit die herstellerübergreifende Wiederverwendung der entwickelten Algorithmen eingeschränkt ist. Hier würde eine Standardisierung die Einsatzchancen der Robotik weiter verbessern.

In zukünftiger Forschung kann der vorgestellte Algorithmus dahingehend erweitert werden, dass Öffnungen sowie Aussparungen berücksichtigt werden. Weiterhin könnte die Möglichkeit der Positionsänderung des Roboterarms beispielsweise durch ein Fahrwerk die Fertigung in-situ ermöglichen und somit die herstellbaren Wandanordnungen erweitern und die Logistikkosten senken.

Literatur

- BOCK, T. & LINNER, T. (2015a): Robotic Industrialization – Automation and Robotic Technologies for Customized Component, Module, and Building Prefabrication. Cambridge University Press, New York.
- BOCK, T. & LINNER, T. (2015b): Robot-Oriented Design – Design and Management Tools for the Development of Automation and Robotics in Construction. Cambridge University Press, New York.
- BOCK, T. & LINNER, T. (2016): Construction Robots – Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots. Cambridge University Press, New York.
- BRAUMANN, J. (2017): Robots as Design Interfaces - Toward New Processes Beyond Mass Production. Online Abrufbar unter: https://au-storage-2017.s3.amazonaws.com/sessionFiles/81103/Class_Handout_FAB124945_Robots_as_Design_InterfacesToward_New_Processes_Beyond_Mass_Production_Johannes_Braumann.pdf (22.06.2018).
- BRAUMANN, J. & BRELL-COKCAN, S. (2011): Parametric Robot Control integrated cad/cam for Architectural design. Online Abrufbar unter: http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia11_242.content.pdf (22.06.2018).
- HAUSKNECHT, K. & LIEBICH, T. (2016): BIM-Kompodium – Building Information Modelling als neue Planungsmethode. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- PREIDEL, C., DAUM, S. & BORRMANN, A. (2017): Data retrieval from building information models based on visual programming. In: Visualization in Engineering (2017) 5:18, 1-14.
- RITTER, F., PREIDEL, C., SINGER, D., & KAUFMANN, S. (2015): Visuelle Programmiersprachen im Bauwesen – Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen. In: Tagungsband Forum Bauinformatik 2015, Wichmann Verlag, Berlin, 210-219.
- WEBER, W. (2009): Industrieroboter – Methoden der Steuerung und Regelung. Carl Hanser Verlag, München.

Tangible Alignment Design

Štefan Markič¹, Jonas Schlenger² and Ivan Bratoev³

¹Chair for Computational Modelling and Simulation · Technische Universität München ·
Arcisstraße 21 · 80333 München · Germany ·

E-Mail: stefan.markic@tum.de

²Chair for Computational Modelling and Simulation · Technische Universität München ·
Arcisstraße 21 · 80333 München · Germany ·

E-Mail: jonas.schlenger@tum.de

³Chair of Architectural Informatics · Technische Universität München ·
Arcisstraße 21 · 80333 München · Germany

E-Mail: ivan.bratoev@tum.de

An alignment is the top most semantic element of any linear infrastructure asset. It represents the backbone of the geometric shape and linear positioning of other objects. At the beginning of any infrastructure project many alignments are designed and compared in a variant study. We developed an extension for the CDP // Collaborative Design Platform which allows for interactive alignment design. As established in practice the alignment and thus its design is split in two planes: the horizontal alignment and the vertical alignment. This way of input is established in the practise and preferred by the engineers. However, the possibility of interaction with the tangible interface benefits greatly in the early stages of the project. Additionally, this could provide the asset owner with tangible information about the alignment in question without the unnecessary overhead of design applications, or help students understand the topic more easily and clearly.

Keywords: Infrastructure, collaborative design platform, tangible BIM, alignment design

1 Introduction

1.1 Motivation

One of the design fields in civil engineering is the design of an infrastructure asset. The design of a road or a railway is a complex task, involving engineers from multiple disciplines. One of the first steps undertaken when designing a new infrastructure object is deciding where its main axis lies – its alignment. To cite the CEO of OBERMEYER Planen+Beraten GmbH:

“He who controls the alignment, reigns over the project.” (KRETZ 2017)

In the search for a harmonious route many different criteria need to be considered. These include construction costs like earthworks and elements’ quantities on the one side as well as ecological and social impacts like noise pollution and traffic network improvements on the other side.

In this study we focus on the early design stage in the infrastructure sector. Here, multiple options and variants are designed and compared among each other. The design parameters and information have a certain amount of fuzziness to it, which are further refined in the later stages of the project. Many of the current design tools available on the market provide iden-

tical support for all phases – from the early design to the detailed design. There is no differentiation in the processes and thus the intuitive and abstract design needs to be very concrete already in the early stages. However, there is no need for precise data and exact decisions, a certain amount of fuzziness and uncertainty is very welcome.

1.2 Design

Architectural and engineering design is a challenging task belonging to the ill-defined family of problems (CROSS 2008). Such a problem does not have a single best solution (like chess does) and may even have many correct approaches all leading to different but equally good solutions. The problem description cannot be clearly specified – solution focused strategies are therefore perhaps the best way of tackling design problems (CROSS 2008). The designer needs to couple innovative ideas and daring approaches in his iterative search for the perfect design. The more options he can produce and evaluate, the more certain he is about the quality of the proposed solutions.

In the last decades, computers have been increasingly integrated in everyday civil engineering project work. Digital simulation and complex calculations can be done on the fly and thus massively reducing the erroneousness while saving the time and resources needed for the project's completion. However, these methods are mostly used in the later design stages because they require precise models rich with various semantic and geometric information (RITTER & SCHUBERT 2014). Coupling this with the fact that design changes get increasingly complex and more expensive as the project progresses, the need for an earlier integration of digital methods in a project is obvious. A design decision support system (DDSS) provides useful information (e.g., costs, quantities, wind and visibility analysis, ...) that can help the designer lead the project in a sustainable way (SCHUBERT 2014).

In engineering design in general, boundary conditions and design restrictions from various sources and of different complexity need to be considered during the design. Additionally, the modelling tools being used can obstruct the process with their user interface (UI) and specific quirks. As such, a substantial amount of brain power is spent for handling, which is otherwise much needed for innovation. A clear and intuitive way of representing information as well as using haptic elements like three-dimensional (3D)-blocks and moulds for user input can immensely enhance the design process. The user can draw conclusions much more easily and react and adapt his designs accordingly. Following these findings, a new approach is sought for regarding the design, planing and communication processes (SCHUBERT 2012).

1.3 CDP // Collaborative Design Platform

An example of a DDSS is the CDP // Collaborative Design Platform, continuously developed in an interdisciplinary research group from 2010 (SCHUBERT 2012). Tangible design is made available through an interactive table (A) (see Figure 1). The data can be visualised on the table through the projector (B). Touch gestures and physical objects are registered by two infrared sensors (D) and (E) and by the depth camera (I). The fusion of the information is done by the processing unit (F). An additional 3D-view is shown separately as a projection (G, H). With this, the advantages of both the sketch and the model are made available to the user. Thus, the engineer can focus on the design task at hand and not be bounded by the tool's capabilities (SCHUBERT 2012).

At first, the CDP included the design of building placement within a city environment with wind simulation and pedestrian visibility analysis (SCHUBERT 2014). In the recent years, the CDP has seen multiple usages enhancing building's energy simulations (RITTER AND SCHUBERT 2014) and district heating networks (BRATOEV et al. 2017). The framework was extended to include support for visual programming which was showcased on diverse city simulations (SCHUBERT, BRATOEV & PETZOLD 2017). In our study we developed a new extension for the CDP looking at another area of engineering: the infrastructure design.

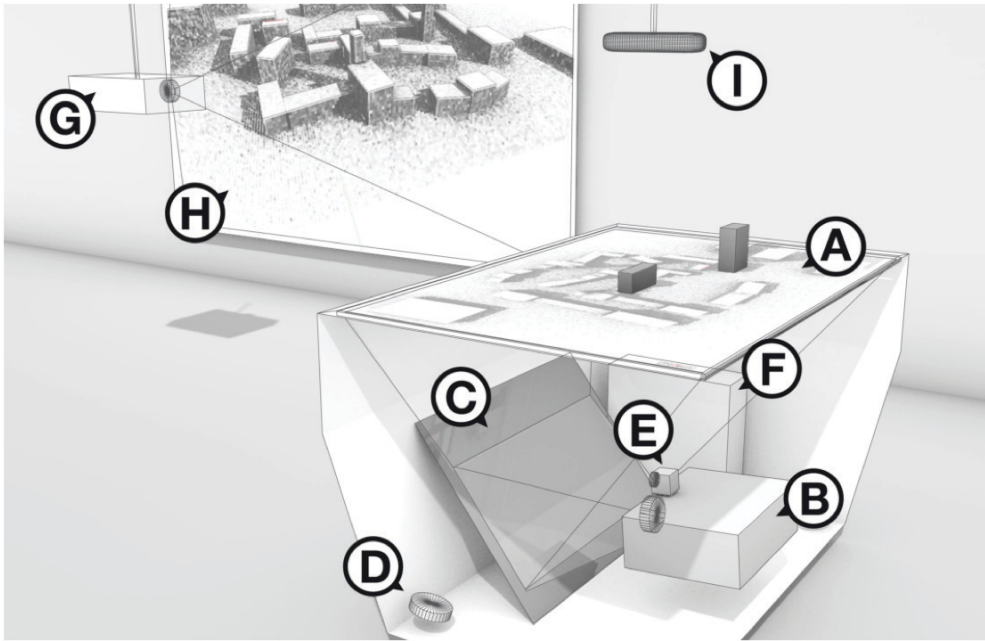


Fig. 1: The architecture of the CDP // Collaborative Design Platform (CDP): the interactive projection table (A), the projector (B), the mirror between A and B (C), the infrared sensors (D and E), the computing unit (F), the second projector (G), the projection plane (H) and the depth camera (I) (SCHUBERT 2012).

2 Alignment

The alignment is the backbone of every infrastructure object as it describes the object's base curve. It is its top most abstraction and serves as a positioning reference. It can be compared to the structural axes in the building sector.

2.1 Geometry

An alignment can be accurately represented as a 3D-curve in the engineering Cartesian coordinate system (x,y,z) . It is a superposition of two planar curves: the horizontal alignment (HA) and the vertical alignment (VA). HA is the projection of the aforementioned 3D-curve onto the horizontal (x,y) plane. As usual in practice, we define a new coordinate axis s along

the HA called the stationing axis. VA is the projection of the 3D-curve on the curvilinear (s, z) plane.

Each alignment consists of an ordered array of elements of three types: straights, curves, and transition curves. There are many types of curves and transition curves used in practice. The used types depend on the type and category of the infrastructure asset and are presented in Table 1. Knowing the order, the types, and the parameters of each individual element in both HA and VA the resulting alignment is uniquely defined.

Table 1: Different types of elements for alignments of different infrastructure objects. All types and alignments include straight elements, which are excluded from the table¹.

Type	Alignment	Curve	Transition curve
Roadway	HA	circular arc	Clothoid
	VA	circular arc, parabolic arc	-
Railway	HA	circular arc	clothoid, Bloss curve, Vienna curve, sinusoid, cosinusoid, cubic parabola, bi-quadratic parabola, Schramm curve
	VA	circular arc, parabolic arc	-
Magnetic levitation tracks	HA	circular arc	clothoid, sinusoid
	VA	circular arc	Clothoid

2.2 Modelling

There are two possible ways to uniquely represent both alignments, either by segments or point of intersection (PI). The former option considers each alignment's element to be an individual segment with its own parameters. The latter option represents the HA and VA with an ordered array of points – points of horizontal intersection (PHIs) and points of vertical intersection (PVIs), respectively. These can be obtained by extending all sections of zero curvature to obtain cross points.

Both options are exemplary shown on Figure 2 for a typical road alignment. The HA includes elements of type straight, circular arc and clothoid transition curve, while the VA includes elements of type straight and parabolic curve. The used notation is explained below.

- A_i^b and A_i^a or A_j are the transition curve parameters before (b) and after (a) the curve at i -th PI or at j -th segment. Here exemplary the clothoid parameter $A \geq 0$ in [m], however other parameters may be needed for other transition curves.
- b_j is the bearing of the tangent at the beginning of the j -th segment in HA, i.e., the azimuth angle.
- g_j is the grade of the tangent at the beginning of the j -th segment in VA, i.e., the slope in the direction of s -axis.
- i is the index of a PI.
- j is the index of a segment.

¹ The possible types have been obtained from the software ProVI: www.provi-cad.de

- l_j is the length of the j -th segment. The length is always measured along the s -axis.
- R_j or R_i is the radius of the curve at the i -th PI or at j -th segment (in [m]). In case of a parabolic curve, the value denotes the radius at its vertex.
- $[x_i, y_i]^T$ and $[s, z_i]^T$ are the coordinates of the i -th PI in HA and VA, respectively.
- $[x_j, y_j]^T$ and $[s_j, z_j]^T$ are the coordinates of the beginning of the j -th segment in HA and VA, respectively.

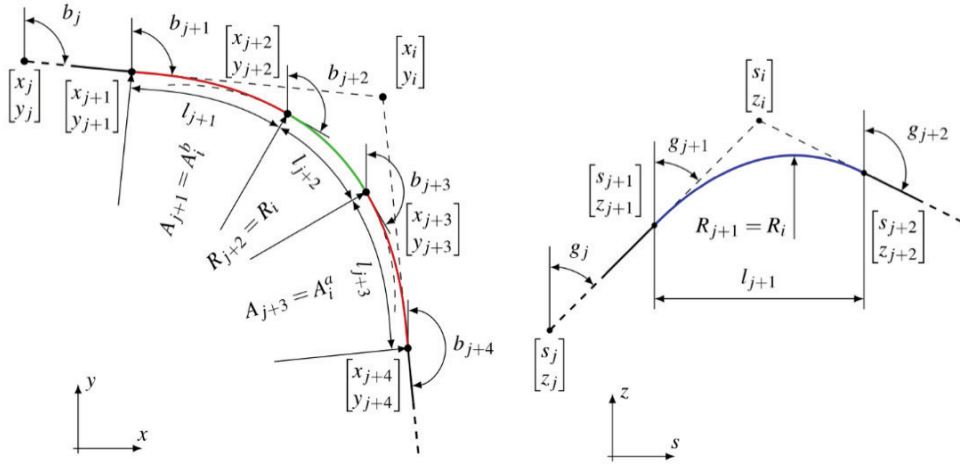


Fig. 2: Different types of segments and their relation to a PI for a HA (left) and VA (right). The segment's length l_j is only marked for curved elements.

3 Process

Our process is graphically depicted in Figure 3 and is described in the following sections.

3.1 Digital Terrain Model

When designing, the data about the already existing objects is a necessary input. In the case of the alignment design, this is topography, the existing infrastructure network and additional geospatial data. The former is the bare minimum, otherwise the VA design cannot take place (MAKANAE & MATSUDA 2018). A common form of representing topographical data is with a digital terrain model (DTM) whose geometry is a triangulated irregular network (TIN). TIN consists of 3D points connected in irregularly shaped triangles and is usually obtained from a field survey.

To depict the 3D nature of the DTM on the two-dimensional (2D) surface of the CDP we use the contour lines as established in the practice. First the minimal and the maximal elevation z_{min} and z_{max} of the TIN is determined. This interval is then split in an array of distinct values $z_{min} \leq z_i \leq z_{max}$ for which the contour lines are calculated. For each of the values z_i the following procedure is carried out. The vertices of each triangle are split into two groups: those above and those below the z_i . If one group is empty, the triangle is skipped since it is either wholly above or wholly below the height z_i . Otherwise, one group has a

single vertex (called A) and the other group has two (called B and C). For each of the edges AB and AC we linearly interpolate the elevations of the vertices in order to obtain the x and y coordinates of the two points with elevation z_i . These two points are connected with a line and the procedure continues until all the elevation values z_i have been processed.

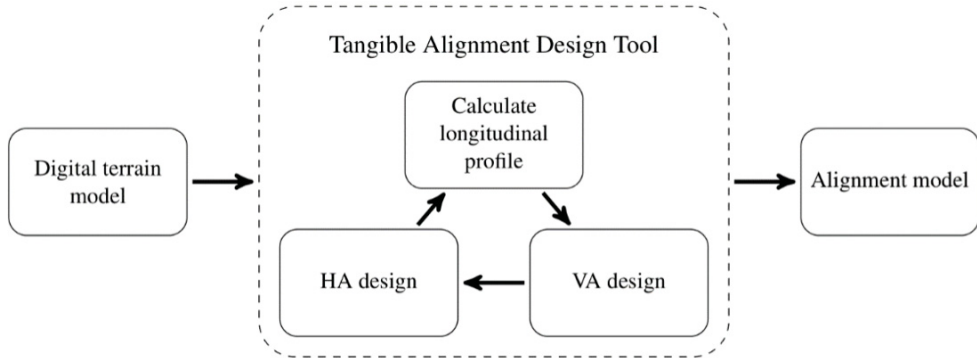


Fig. 3: The process of alignment design.

Similarly to calculating the contour lines for the design of the HA, we derive a longitudinal profile for the design of the VA. This is calculated by intersecting the contour lines with the HA and connecting the points.

3.2 User Interface

Since we are designing a tangible interface, it is of utmost importance for the UI to be clear and concise. With that, the user can focus on the design task at hand and not be distracted by the interaction with the system. Following the definitions in Section 2 we opted for modelling of the alignment using an array of PIs. The design interface is split in two separate windows, one for each of the alignments (see Figure 4). In this first prototype, the user can add, select, move or delete a PI. Additionally, the radius of the curve can be set in a separate menu for the currently selected PI.

3.3 Result

The proposed extension only serves as a preliminary design tool as it is expected for the engineer to wish to refine his design in later design stages. A 3D-polyline represents the alignment in a simple yet sufficiently precise manner depending on the density of points. However, changes to such representation are very demanding as each individual point need to be adjusted. Therefore, we opted for a parametric alignment model export that retains as many of the design parameters intact as possible.

There are many formats available which include a model of an alignment, like industry foundation classes (IFC), LandXML and Objekt Katalog Straße (OKSTRA) (AMANN et al. 2014). The chosen format was the recently developed IFC-alignment, as it is becoming internationally very well accepted. The IFC standard extension opted to model the alignment entities according to the segment definitions schema (LIEBICH et al. 2017). Thus, we need to transform from PIs to the segments following the definitions from Section 2.2.

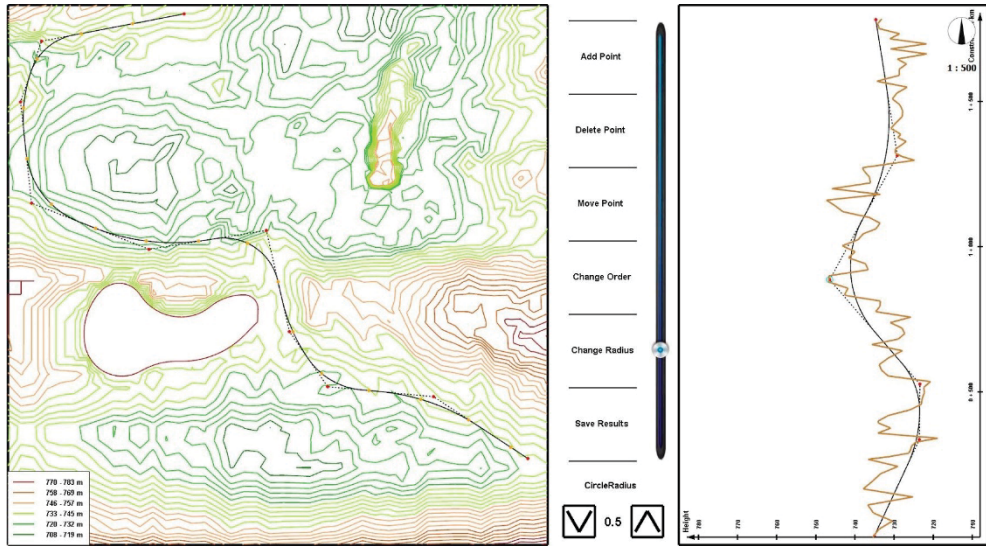


Fig. 4: The UI of the prototype as seen on projection plane (A) from Figure 1. The HA design with contour lines (left) and the VA design with the longitudinal profile (right). Between them a panel with different options and parameters.

4 Conclusions

In our study we present an interactive tool for alignment design. It was developed atop of the CDP // Collaborative Design Platform which incorporates a tangible interface for combining physical working models with interactive simulations and analyses in real time. The tool can be best used during preliminary studies where many different variants are designed and evaluated. It is a great enhancement in the early design stages of an infrastructure project. Additionally, benefits can be achieved when used for teaching or project meetings with the asset owner.

4.1 Future Work

In the future, further geodata like water elements (lake and rivers), existing infrastructure network and environmentally protected zones can be incorporated as input to further support design decisions. Additionally, the tool could be extended to support virtual reality alignment design as proposed by MAKANAE & MATSUDA (2018). The missing functionality of transition curves can be added to the parameters of the PI.

As shown by BRATOEV et al. (2017) and RITTER & SCHUBERT (2014), simple simulations and calculations could be carried out in the background to additionally support the engineer at evaluating different variants. These include noise simulations and earthworks costs which are typical quality criteria in the infrastructure sector. Design with the use of haptic elements could be incorporated for the positioning and size of noise protection walls or bridges and tunnels.

4.2 Acknowledgements

We would like to thank OBERMEYER Planen+Beraten GmbH for financial support and providing their software ProVI as a reference implementation. This work is part of the Bachelor Thesis by Jonas Schlenger under the supervision of Štefan Markič and Ivan Bratov.

Literature

- AMANN, J., FLURL, M., JUBIERRE, J. R. & BORRMANN, A. (2014), An alignment meta-model for the comparison of alignment product models. In: *Proc. of the 10th European Conference on Product & Process Modelling*, Vienna, Austria.
- BRATOV, I., BONNET, C., CHOKHACHIAN, A., SCHUBERT, G., PETZOLD, F. & AUER, T. (2017), Designing and evaluating district heating networks with simulation based urban planning. In: BURLANDO, M., CANEPA, M., MAGLIOCCO, A., PERINI, K. & REPETTO, M. P. (Eds.), *International Conference on Urban Comfort and Environmental Quality*, Pp. 167–174. University of Genoa, Italy, Genova, University Press.
- CROSS, N. (2008), *Engineering design methods: Strategies for product design*, 4. ed. edition. Chichester: Wiley.
- LIEBICH, T., AMANN, J., BORRMANN, A., CHIPMAN, T., HYVÄRINEN, J., S. MUHIČ, MOL, L., PLUME, J. & SCARPONCINI, P. (2017), IFC Alignment 1.1 Project, IFC Schema Extension Proposal.
- MAKANAE, K. & MATSUDA, H. (2018), Application of the Simplified HMD-Based VR System to Road Design Process. In: *Proceeding of the 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Tampere, Finland.
- RITTER, F. & SCHUBERT, G. (2014), Integration digitaler Gebäudesimulationen in den frühen Entwurfsphasen. In: KREGER, M. & IRMLER, R. (Eds.), 26. Forum Bauinformatik, Vol. 26, Pp. 249–257. Darmstadt: Shaker.
- SCHUBERT, G. (2012), Early design support: Interaktive Simulationen in frühen Entwurfsphasen. In: HEGEMANN, F., KROPP, C., RAHM, T., AND SZCZESNY, K. (Eds.), *Forum Bauinformatik 2012*, Vol. 4 of Informationstechnik, Pp. 151–158. Europäischer Univ.-Verl and Univ.-Verl.
- SCHUBERT, G. (2014), *Interaktionsformen für das digitale Entwerfen: Konzeption und Umsetzung einer rechnergestützten Entwurfsplattform für die städtebaulichen Phasen in der Architektur*. PhD thesis, Technische Universität München, München.
- SCHUBERT, G., BRATOV, I. & PETZOLD, F. (2017), Visual programming meets tangible interfaces – generating city simulations for decision support in early design stages. In: *ShoCK! – Sharing Computational Knowledge! – Proceedings of the 35th eCAADe Conference*.

An enhanced full waveform inversion (FWI) application to damage identification in dams

Muyiwa Alalade

Institute of Structural Mechanics · Bauhaus-Universität Weimar · Marienstraße 15 · 99423 Weimar ·
E-Mail: muyiwa.alalade@uni-weimar.de

To ensure the optimal and safe operation of new and old dams, the frequently monitoring of these structures is necessary. However, many of the conventional methods employed are cumbersome, expensive and time consuming. Therefore, we propose the application of numerical and inverse analysis method to ascertain in a non-destructive manner, zones of weaknesses in the dam. The proposed method, draws inspiration from the successful application of full waveform inversion (FWI) to subsurface exploration. It involves the propagation of elastic/seismic waves within the dam structure (and its foundation) and the mathematical reconstruction of the wave behavior. The FWI is enhanced by a dynamic hydro-mechanical coupled extended finite element model (XFEM). The XFEM model provides higher quality starting models for the FWI, thus increasing the efficiency of the inversion and robustness of the method.

Keywords: Damage detection, Inverse analysis, Full waveform inversion, XFEM

1 Introduction

Dams plays a vital role in the sustenance of communities. They serve as a source of energy generation, flood defense, irrigation, water supply and recreation. Many dams in operation today are in operation beyond the designed operational cycle. Furthermore, the deterioration of dam's structural integrity resulting both from short term effects (e.g. earthquakes, impact loads) and from long term effects (e.g. aging, physical and chemical weathering, fatigue) are more pronounced. Though these effects may not lead to an immediate collapse/failure of the dam, it is necessary to quickly identify regions which may jeopardize the safety of the dam. Unfortunately, the conventional methods are tedious, time consuming, expensive and inefficient.

To tackle these challenges, various numerical models such as, smeared crack approach (LAHMER, T. 2010), plastic damage model (LEE, J. & FENVES, G. L. 1998), mesh-free cracking particles (RABCZUK, T., ET AL. 2010) and extended finite element methods (XFEM) (BELYTCHKO, T. & BLACK, T. 1999), have been proposed. The identification of damages in dams is made possible by the inverse analysis of any of these models. The quality of the results can be improved by considering the coupling effects of various phenomena present in the operational life cycle of the dam such as in (LAHMER, T. 2010; ALALADE, ET AL. 2018).

Furthermore, seismic waves have increasingly been applied to probe and obtain information on the structural integrity of mainly sub-surface structures. Information from the reflection, refraction and diffraction of these waves gives insight into possible anomalies which may negatively impact the structural stability and performance.

Although there exists several wave-based methods, the Full Waveform Inversion (FWI), initially proposed by (LAILLY, P. 1983; TARANTOLA, A. ET AL. 1984), is regarded as the modern

seismic imaging technique which utilizes a comprehensive representation of the interaction between wave physics and subsurface properties. It is a data fitting procedure, which considers information contained in the whole recorded signal (i.e. information from the reflection, refraction, diffusion, amplitude) to compute high resolution estimates of the medium/structure's material parameters.

The FWI method, as a result of the large degree of freedom, utilizes a gradient based optimization strategy. Although providing high resolution images to characterize damages, it is highly non-linear and ill-posed. Thus, the success of the FWI is largely dependent on the initial model. The coupled dynamic hydro-mechanical XFEM, in comparison to the FWI, is based on a global optimization strategy. Therefore, it is independent on the starting model. The drawback of this method is the limited number of damages identified due a lesser number of degrees of freedom/model parameterization. To efficiently identify damages in dams, a 2-stage XFEM-FWI coupled method which exploits both the advantages of the dynamic coupled hydro-mechanical XFEM and the successful track record of FWI in geophysical exploration is proposed.

2 Numerical models

In this section, the forward models and inverse analysis strategy employed for the identification of damages in dams described. The dynamic coupled hydro-mechanical XFEM model, derived in (ALALADE,ET AL. 2018) can be solved in the time and frequency domain to obtain the dam response as a result of an externally applied dynamic load. The dynamic response is obtained from the solution of equation 1. A staggered procedure incorporating the Newmark time integration scheme for the mechanical part and the forward finite difference method for pore pressure part of the coupled hydro-mechanical equation is employed.

$$S\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{H}\mathbf{p} + \mathbf{Q}^T\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{q} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} - \mathbf{Q}\mathbf{p} = \mathbf{f} \quad (2)$$

Where \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$, $\ddot{\mathbf{u}}$ are the dams' displacement, velocity and acceleration vectors and \mathbf{p} , $\dot{\mathbf{p}}$ are vectors of pore pressure and first derivatives of the pore pressure. The XFEM mass matrix \mathbf{M} , stiffness matrix \mathbf{K} , coupling matrix \mathbf{Q} , compressibility matrix \mathbf{S} , permeability matrix \mathbf{H} and force \mathbf{f} and fluid flux \mathbf{q} vectors are defined in (ALALADE,ET AL. 2018; NANTHAKUMAR, ET AL.2014).

For the FWI, elastic waves propagating in a 2D isotropic linear-elastic medium, assuming only non-zero displacements in the horizontal direction and depth (x-z plane) is described by the system of partial differential equations (AKI, K. & RICHARDS, P. 1980) in equation 2. The elastic wave equation is solved numerically for the displacements \mathbf{u} , stresses σ_{xx} , σ_{xz} , σ_{zz} , density ρ and Lamé parameters (λ , μ) using a time domain 2D finite difference scheme. It is discretized in time and space with each of the parameters placed on a staggered grid (VIRIEUX, J. 1986; LEVANDER, A. R. 1988).

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = f_x, \quad \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = f_z \quad (3)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (5)$$

It is necessary to satisfy spatial and temporal sampling conditions for the wavefield to prevent numerical artifacts and instabilities during the finite difference simulation. To obtain material parameter values for the dam using the FWI, the objective function $E(\mathbf{m})$ in equation 3 which is to be minimized is the residual elastic energy between the experimental or field data \mathbf{u}^{exp} and the simulated data from our forward model \mathbf{u}^{FWI} in equation 2. That is the L^2 -norm of the error between the model response and the field or experimental data.

$$E(\mathbf{m}) = 0.5 \mathbf{u}^{\text{FWI}} \parallel (m) - \mathbf{u}^{\text{exp}} \parallel_{L^2} \quad (6)$$

The objective function is minimized by iteratively updating the model parameters \mathbf{m}_n at iteration step n , starting with an initial background model \mathbf{m}_0 , along a search direction using a gradient based approach (NOCEDAL, J. AND WRIGHT, S. 2006).

3 Numerical simulation and discussions

To demonstrate the efficiency and robustness of the proposed method, a full waveform inversion (FWI) is carried out for the true dam model with material properties depicted in table 1 using the starting model in figure 1. This depicts the original material property distribution immediately after the dam is constructed. The anomalies represent weaknesses in various regions and of varying magnitudes. In the dam structure, the topmost anomaly represents a 20% reduction in the parameter values (V_p , V_s , ρ), the second 10% and the third (i.e crack zone) has a 30% reduction. All the anomalies in the foundation have an 70% reduction in the material parameter values. Thereafter, the XFEM enhanced starting model is used to initiate the FWI considering 0%, 2% and 10% noise in the measured data.

Table 1: Dam material properties for true model

	V_p [m/s]	V_s [m/s]	ρ [kg/m ³]
Dam body	3500	2200	2000
Dam tunnel	0	0	1.25
Dam foundation	4500	2700	2550
Water	1500	0	1000
Air/Vacuum	0	0	1.25

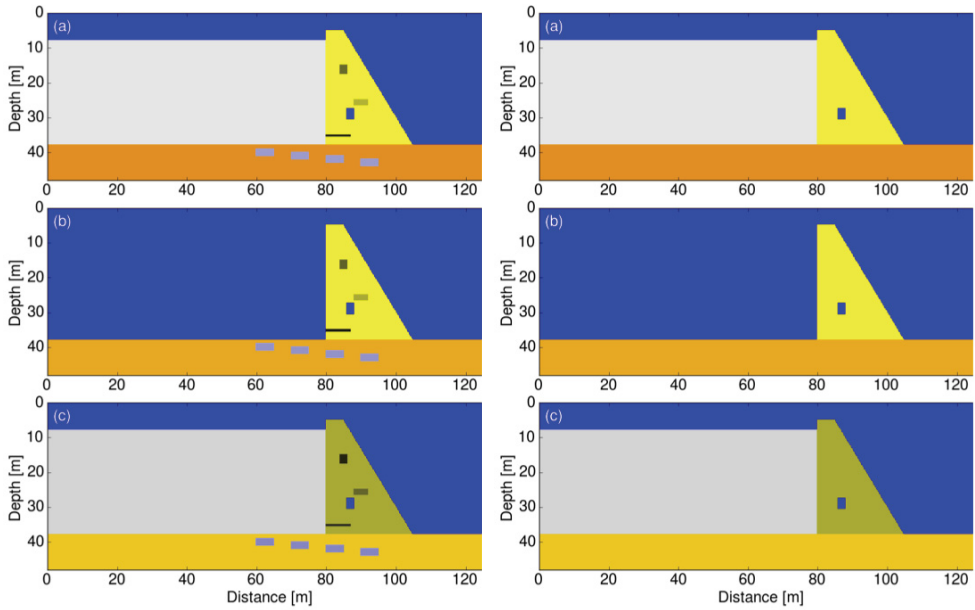


Fig. 1: Distribution of seismic velocities (V_p and V_s) and density ρ in the air, water, foundation and dam structure for the (a) true and (b) initial model.

The computational domain has a height of $48m$ and length of $128m$. It comprises of the dam structure $28m$ high with a crest and base width of $4.5m$ and $19m$ respectively. A $30m$ by $80m$ water reservoir, a $10m$ deep foundation and the surrounding air is also considered. A 2D finite difference scheme on a staggered grid is used to solve the elastic wave equation. The computational domain is truncated using a $2.5m$ (i.e. 10 grid points) thick Convolutional-PML (C-PML) at both sides and at the bottom of the domain. A source-sensor setup consisting of 28 active sources and 135 receivers/sensors in figure 2 is used to acquire the data required for the FWI. A $0.4 - 0.8kHz$ band-pass filtered spike wavelet is sequentially emitted from each of the sources (e.g. airguns) for a duration of $0.1s$ and the time interval (dt) used for the analysis is $3 \times 10^{-5}s$ which satisfies the Courant-Friedrichs-Lewy criterion for stability.

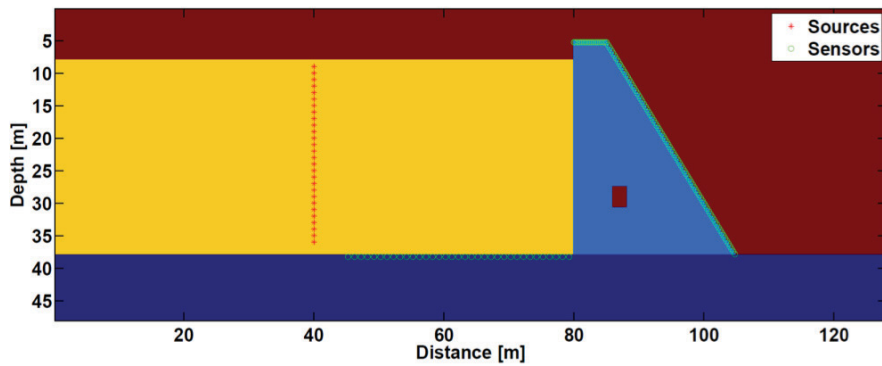


Fig. 2: Acquisition setup showing distribution of sources and sensors in the domain.

In order to use the output of the hydro-mechanical XFEM analysis as an a priori for the FWI, a small region bounding the identified crack location is smeared/replaced by lower material property values. In this case a 5% degradation of the starting model in the crack region is applied. The proposed 2 –step coupling is carried out considering varying levels of noise in the data measurements to avoid inverse-crimes. Results obtained in figure 3 and 4 display a performance improvement in the proposed 2 –step coupled XFEM-FWI method as compared to the uncoupled FWI. Apart from the final cost function value being lower for the 2 –step method, the convergence is quicker, thus reducing the computational cost especially when stricter stopping criteria such as minimal/lower number of iterations are considered.

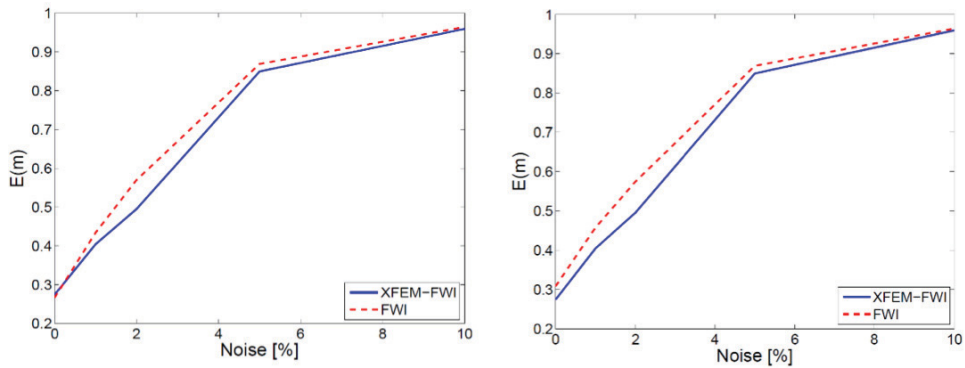


Fig. 3: Cost function based performance comparison between the uncoupled FWI and coupled XFEM-FWI model at increasing noise levels.

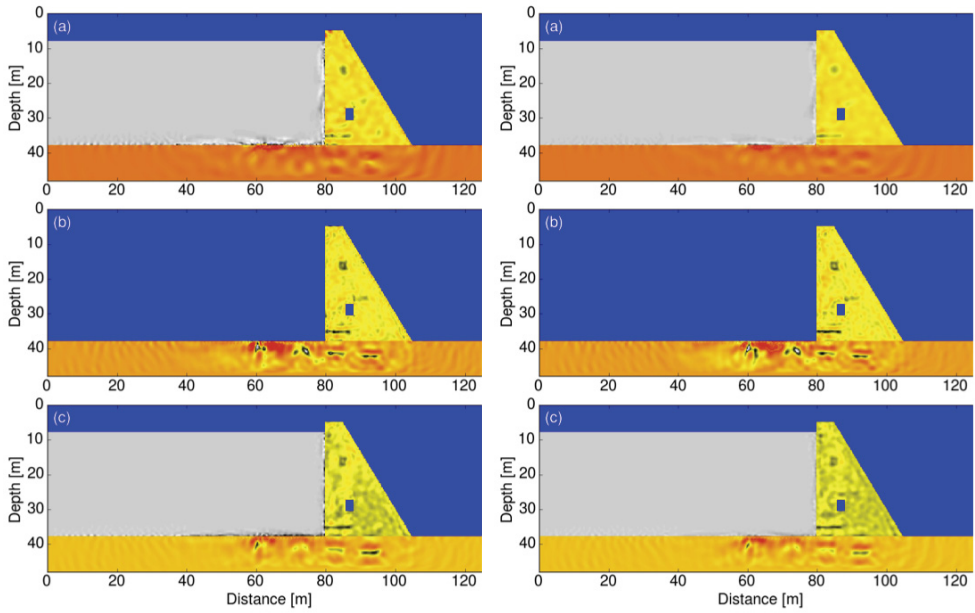


Fig. 4: Comparison between the performance of the uncoupled FWI and coupled XFEM-FWI model at increasing noise levels.

4 Conclusion

The full waveform inversion (FWI) has proven to be an effective non-destructive tool for ascertaining the material properties and structural integrity of dams. To alleviate some of the drawbacks associated with the FWI method, a 2 –step XFEM coupled FWI method is proposed.

The proposed method shows improvement in the quality and identification of regions of structural weaknesses especially at higher noise level in the measured data. Also, since the first step of the proposed model requires less computational effort, it enhances the suitability of the method to application in autonomous dam monitoring systems. Here the XFEM step is implemented more frequently and when damages are found at critical regions, it acts both as an a priori and a trigger for the FWI (second step), producing higher resolution results.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support of the German Research Foundation (DFG) under the grant LA 2869/10-1.

Literature

- AKI, K. & RICHARDS, P. (1980), *Quantitative Seismology, Theory and Methods*, vol. 1. Wiley & Sons. New York.
- ALALADE, M., NGUYEN-TUAN, L., WUTTKE, F., & LAHMER, T. (2018), Damage identification in gravity dams using dynamic coupled hydro-mechanical XFEM. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 14(1):157-175.
- BELYTSCHKO, T. & BLACK, T. (1999), Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *International journal for numerical methods in engineering*, 45(5):601-620.
- LAHMER, T. (2010), Crack identification in hydro-mechanical systems with applications to gravity water dams. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 18(8):1083-1101.
- LAILLY, P. (1983), The seismic inverse problem as a sequence of before stack migrations.
- LEE, J. & FENVES, G. L. (1998), Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of engineering mechanics*, 124(8):892-900.
- LEVANDER, A. R. (1988), Fourth-order finite-difference P-SV seismograms. *Geophysics*, 53(11):1425-1436.
- NANTHAKUMAR, S., LAHMER, T., & RABCUK, T. (2014), Detection of multiple flaws in piezoelectric structures using XFEM and level sets. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 275:98-112.
- NOCEDAL, J. & WRIGHT, S. (2006), *Numerical optimization*. Springer Science & Business Media.
- RABCUK, T., ZI, G., BORDAS, S., & NGUYEN-XUAN, H. (2010), A simple and robust three-dimensional cracking particle method without enrichment. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 199(37):2437-2455.
- TARANTOLA, A. et al. (1984), The seismic reflection inverse problem. *Inverse problems of acoustic and elastic waves*, pages 104-181.
- VIRIEUX, J. (1986), P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, 51(4):889-901.

Session 6:

Structural Health Monitoring

Fault diagnosis in wireless structural health monitoring systems based on support vector regression

Maria Steiner, Henrieke Fritz, Leon Thiebes and Kosmas Dragos

Chair of Computing in Civil Engineering · Bauhaus University Weimar · Coudraystr. 7
99423 Weimar · Email: maria.steiner@uni-weimar.de

Reliable operation of sensors in structural health monitoring (SHM) systems is important, as sensor faults may affect the quality of monitoring by causing erroneous judgments of structural conditions. Detecting and isolating sensor faults falls within the scope of fault diagnosis (FD), which has been widely applied in SHM. From a wireless SHM perspective, recent studies have proposed so-called “analytical redundancy” approaches for detecting and isolating sensor faults. Analytical redundancy refers to methods using information inherently redundant to the SHM system to produce virtual sensor outputs, which are then compared to actual sensor outputs. In FD approaches using analytical redundancy, FD is achieved through machine learning methods, such as artificial neural networks, the virtual sensor outputs being obtained using the correlation between structural response data sets. In this paper, an analytical redundancy FD approach for wireless SHM systems based on support vector regression (SVR) is presented, representing a computationally efficient machine learning approach for preserving the constrained resources of wireless sensor nodes. The FD-SVR approach is implemented into a prototype wireless SHM system, enabling automated, decentralized sensor fault detection and isolation. The ability of the embedded SVR algorithm to detect and isolate sensor faults is showcased in laboratory experiments, proving the ability of the FD-SVR approach to ensure the reliable, i.e. non-faulty, operation of sensors in wireless SHM systems.

Keywords: Fault detection and isolation, structural health monitoring, analytical redundancy, wireless sensor networks, support vector regression

1 Introduction

Information obtained from structural health monitoring (SHM) systems aims to issue alerts for taking further action against potential hazards posed to structural integrity (LYNCH et al., 2016). Furthermore, in wireless SHM systems, embedded computing is often leveraged towards conducting SHM tasks on board wireless sensor nodes so as to avoid the power-consuming transmission of entire data sets (DRAGOS & SMARSLY, 2015). The consequent scarcity of raw SHM data renders manual detection of anomalies, such as sensor faults, within the data burdensome. A sensor fault is usually caused by malfunctions or by external factors, resulting in an error and, eventually, in SHM system failure. According to QIN & LI (1999), the five most common sensor fault types are bias, drift, complete failure, gain, and precision degradation. Bias introduces a constant offset in the SHM data, while drift is represented by a linear (incrementing) offset with respect to the actual SHM data (i.e. the SHM data if the fault does not occur). Complete failure results in constant values or noise in the SHM data, gain introduces a scaling factor to the SHM data, and precision degradation contaminates the SHM data with white noise. To ensure reliable operation of wireless SHM systems, sensor faults need to be effectively handled. Referred to as “fault

diagnosis”, managing sensor faults encompasses four stages: i) fault detection, where anomalies in SHM data are recognized, ii) fault isolation, in which the exact location of faults is determined, iii) fault identification, where the type of fault is determined, and iv) fault accommodation, which involves corrective action to alleviate the fault effects.

Fault diagnosis has been a topic of ongoing research since the middle of the last century (MOORE & CHANNON, 1956; VON NEUMANN, 1956; WILLSKY, 1976). Fault diagnosis approaches are usually based on comparisons between virtual sensor outputs and actual sensor outputs (SMARSLY & PETRYNA, 2014). In SHM approaches, virtual sensor outputs are obtained either from installing redundant sensors (physical redundancy) or by exploiting the abundance of structural response data and the inherent correlations between responses from different structural locations (analytical redundancy) (KRAEMER & FRITZEN, 2007). The correlation between structural response data sets is either defined via physics-based models or using data-driven models, if no a priori knowledge is available. For example, artificial neural networks have been used in several studies as data-driven models for fault diagnosis (BASIRAT & KHAN, 2009; SMARSLY & LAW, 2014; DRAGOS & SMARSLY, 2016).

Despite the good results obtained from data-driven analysis, methods such as artificial neural networks are classified as “big data methods” requiring large data sets to ensure high quality results. In this paper, a novel computationally efficient data-driven approach towards fault diagnosis is applied. The fault diagnosis approach is based on support vector regression (SVR), which usually performs better with small data sets compared to big data methods (DEBIKE et al., 2001) and enables a conceptually easier implementation, thus allowing embedding algorithms into wireless sensor nodes for performing SVR. As a result, wireless sensor nodes are essentially enabled to autonomously self-diagnose sensor faults, enhancing the decentralization of the SHM system. The work in this paper focuses on fault detection and isolation, but the FD-SVR approach can be easily extended to the other two stages of fault diagnosis. The accuracy and the computational efficiency of the approach is validated through laboratory tests using a prototype wireless SHM system installed on a shear frame structure, which showcase the capability of the FD-SVR approach to detect sensor faults. The paper is structured as follows: First, the background and the underlying theory of the FD-SVR approach is elucidated. Then, the implementation of an embedded SVR algorithm in the SHM system is described. Finally, the validation tests are presented followed by a summary and conclusions as well as suggestions for future research directions.

2 Fault detection and isolation based on analytical redundancy using support vector regression

The fault detection and isolation approach presented in this paper is based on machine learning via support vector regression following the concept of analytical redundancy. In this section, the basic principles of the proposed FD-SVR approach are illuminated.

2.1 Correlation between structural response data sets

Analytical redundancy-based approaches depend on correlations between structural response data sets, in that for producing virtual sensor outputs, input data from correlated

sensors is required. In general, correlation between two data sets i and j is expressed through the correlation coefficient ρ , as shown in Equation (1).

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}(i, j)}{\sigma_i \cdot \sigma_j} = \frac{E[(i - \mu_i) \cdot (j - \mu_j)]}{\sigma_i \cdot \sigma_j} = \frac{\sum_{k=1}^n (i_k - \bar{i}) \cdot (j_k - \bar{j})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (i_k - \bar{i})^2 \cdot \sum_{k=1}^n (j_k - \bar{j})^2}} \quad (1)$$

In Equation (1), “cov” denotes covariance, μ and σ represent mean and standard deviation, respectively, E is the expected value, and the overbar denotes the sample mean. Furthermore, according to the theory of structural dynamics, structural response data sets, such as acceleration response data sets, essentially consist of harmonic functions at frequencies equal to the eigenfrequencies of structures. These harmonic functions are either positively or negatively correlated to each other depending on the shapes of the corresponding vibration modes describing physical oscillations. While positive correlation is represented by a phase shift between the harmonic functions equal to zero, negative correlation is characterized by a phase shift equal to π , as shown in Figure 1. Based on these correlations, structural response data at a specified location can be predicted using structural response data from neighboring locations as input data by applying a machine learning algorithm, such as support vector regression.

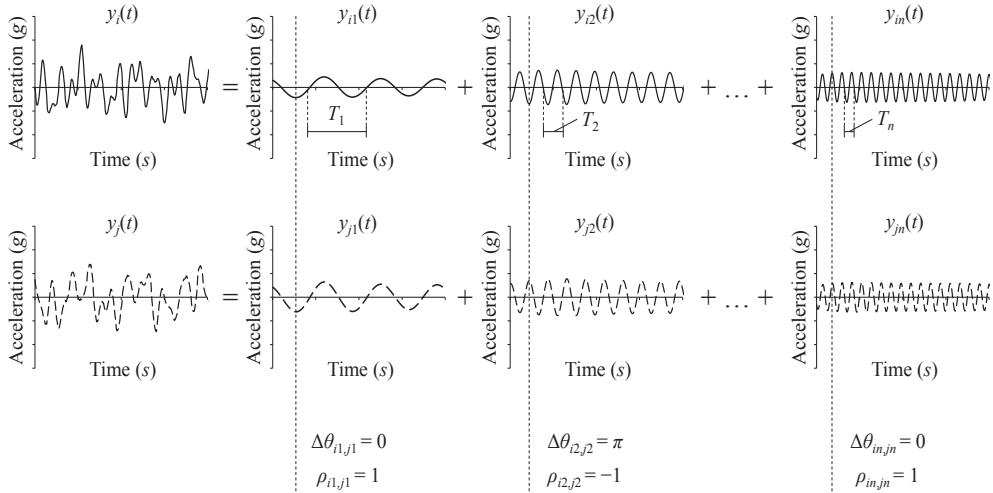


Fig. 1: Correlation between harmonic functions composing structural response data sets.

2.2 A support vector regression algorithm for fault diagnosis

Support vector regression is used for building an approximation function \hat{f} that approximates the behavior of a black box function f , which typically represents numerical models or physical experiments, to reduce the computational cost of calculating all points of f (FORRESTER et al., 2008). Function \hat{f} is constructed from “training data” consisting of input points $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n$ within a domain $D \subset P^k$ and the responses $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T = [f(\mathbf{x}_1), f(\mathbf{x}_2), \dots, f(\mathbf{x}_n)]^T$, which are obtained from the numerical model or

from the physical experiment under consideration. SVR strategies vary depending on the application; the strategy employed in this paper is the so-called ε -SVR (SCHÖLKOPF & SMOLA, 2002), in which the approximation function is:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \mu + \sum_{i=1}^n w_i \psi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i). \quad (2)$$

In Equation (2), $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ and μ are unknown model parameters, whose values are determined through optimization, and ψ is a Kernel function, which defines the correlation between a new point x and the training data. In this study, a Gaussian Kernel function with $\psi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp(-|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2/\sigma^2)$, with σ^2 being the variance, is implemented. To define the optimal values for \mathbf{w} and μ , the following optimization problem is solved:

$$\min_{\mathbf{w}, b, \zeta} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\zeta_i^+ + \zeta_i^-) : \begin{cases} y_i - \hat{f}(\mathbf{x}_i, \mathbf{w}) \leq \varepsilon + \zeta_i^+ \\ \hat{f}(\mathbf{x}_i, \mathbf{w}) - y_i \leq \varepsilon + \zeta_i^- & \forall i \in [1, n]. \\ \zeta_i^+, \zeta_i^- \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

In the optimization problem shown in Equation (3), the goal is twofold: On the one hand, \hat{f} should deviate from responses y_i for $i = 1 \dots n$ by a value lower than ε . On the other hand, \hat{f} should be as flat as possible, which is ensured by the minimization of $\|\mathbf{w}\|^2$. The equation is expanded by slack variables ζ_i^+ and ζ_i^- to avoid the appearance of infeasible constraints. As a result of introducing the slack variables, some deviations larger than ε may be allowed, but the sum of these deviations should be minimal. Parameter C controls the trade-off between the flatness of \hat{f} and the maximum tolerable deviation higher than ε . Equation (3) is a convex optimization problem, which can be reformulated into a dual quadratic optimization problem by the Lagrangian function and the Karush-Kuhn-Tucker conditions (KUHN & TUCKER, 1951), and it can be easily solved by quadratic programming algorithms for defining the optimal values for \mathbf{w} and μ .

The quadratic optimization problem for the FD-SVR approach assumes structural response data at sensor node j as input points, described by a function of the corresponding data at k other sensor nodes, as shown below:

$$x^{(j)}(t_i) = f_j(x^{(1)}(t_i), \dots, x^{(j-1)}(t_i), x^{(j+1)}(t_i), \dots, x^{(k)}(t_i)). \quad (4)$$

In Equation (4), t_i is the time step, at which the structural response data has been collected, which is defined by the sampling rate and by the measurement duration. With the ε -SVR, function \hat{f}_j is built based on non-faulty data, and approximates the behavior of f_j . To ensure that a close approximation is possible, f_j is reasonably assumed as continuous; this assumption holds only if structural response data from different sensor nodes are correlated.

Based on the ε -SVR principles, a fault diagnosis algorithm is designed, consisting of three phases, the training phase, the implementation phase, and the fault diagnosis phase. In the training phase, training data is collected from each sensor node, and the SVR parameters for each sensor are calculated by solving the optimization problem shown in Equation (3). In the implementation phase, the approximation function \hat{f}_j is applied on node j for $j = 1 \dots k$. In the fault diagnosis phase, each sensor node collects data from other sensor nodes, produces virtual outputs approximating its own structural response data, and compares the

virtual outputs with the actual outputs (i.e. measured structural response data). In the event of discrepancies between the virtual and the actual outputs, a fault detection alert is issued. It should be noted that fault isolation is implicit in this study, since the FD-SVR approach focuses on each sensor node separately.

2.3 Detection criterion for sensor faults

A common criterion for approximating quality is the coefficient of determination R^2 (NETTER et al., 1996), which describes the part of the variation of function f that can be mapped by the approximation function \hat{f} , given by:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{f}(\mathbf{x}_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (5)$$

In Equation (5), y_i is an actual output of \mathbf{x}_i , and $\hat{f}(\mathbf{x}_i)$ is a virtual output of \mathbf{x}_i for $i = 1 \dots n$. The value \bar{y} denotes the mean value of $y_1 \dots y_n$. The values of R^2 lie between 0 and 1, with values close to 1 indicating good approximation. In the training phase, R^2 is calculated using the training data. However, to avoid bias, additional untrained data is collected, called validation data, and applied for validating the value of R^2 . Using the validation data, a reliable R^2 value is obtained and a boundary ε is defined based on the R^2 value. In the fault detection phase, sensor nodes issue fault detection alerts for R^2 values lower than ε . Particular attention should be paid to identifying deviations of R^2 from values indicating non-faulty operations that may be attributed to changes in the structural state, e.g. due to structural damage. To avoid false fault detection alerts, the outcomes from several sensor nodes need to be collaboratively analyzed; fault detection alerts issued by the majority of sensor nodes may indicate structural damage.

3 Implementation of the embedded SVR algorithm into a wireless SHM system and validation tests

The FD-SVR approach is implemented into a prototype wireless SHM system, as described in this section. First, the prototype wireless SHM system is described including the software for embedding SVR into wireless sensor nodes, and, next, the validation tests are presented.

3.1 Implementation of the FD-SVR approach into a wireless SHM system

The prototype wireless SHM system devised for implementing the FD-SVR approach is composed of (i) wireless sensor nodes, (ii) a base station, and (iii) a host computer. The sensor nodes are assigned to collect acceleration response data through integrated accelerometers and to analyze the data directly on board. The objective of the on-board analysis is to predict the output of a sensor node using the acceleration response data from neighboring sensor nodes as input data and to issue fault detection alerts in the event of discrepancies between the predicted output and the actual output of the sensor node. The outcome of the FD-SVR analysis is transferred wirelessly via the base station to the host computer, where the outcome is stored in a database.

The SHM system is installed on a test structure, which is a four-story shear frame structure consisting of four 300×200 mm (length \times width) aluminum plates, resting on four aluminum columns of rectangular 20×2 mm cross sections. The story height is 300 mm, and the short cross section dimension of the columns is aligned with the long dimensions of the plates. The sensor nodes employed in this study are of type “Oracle Sun SPOT” (ORACLE CORP., 2009), each node featuring a programmable 400 MHz ARM main processor, 1 MB RAM, 8 MB flash memory storage, and a tri-axial accelerometer. The experimental setup is shown in Figure 2.

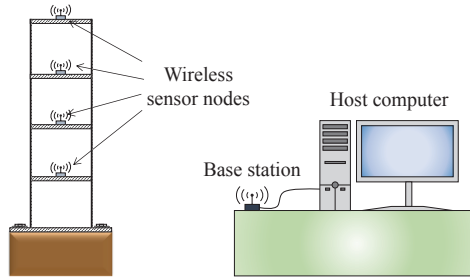


Fig. 2: Test structure and wireless SHM system.

The software for implementing the FD-SVR approach consists of two applications written in Java, one “node-application”, deployed on the sensor nodes, and one “host-application”, running on the host computer. The node-application includes classes managing the sensor nodes operation (e.g. calibration, synchronization, data collection) as well as classes for performing fault detection during the testing phase. The host application classes are assigned with calculating the approximation function for each sensor node upon receiving sets of structural response data (training data) from all sensor nodes, as part of the training phase. The approximation functions are implemented into the corresponding sensor nodes during the implementation phase.

3.2 Validation tests

The validation tests are performed by deflecting the top story from the equilibrium position and by letting the structure vibrate freely. Since the test structure is a shear frame structure, it is expected that the structural response to free vibration is predominantly governed by the fundamental mode of vibration, in which all stories are in phase with each other, and the corresponding harmonic functions are therefore fully correlated. However, in practice the combined contribution of several modes, in which the measured locations of structures may be either in phase or out of phase, may compromise the accuracy of the FD-SVR approach. Therefore, the applicability of the FD-SVR approach needs to be case-specifically assessed based on the expected structural dynamic behavior. Despite the prevalence of the fundamental mode in the validation tests, non-negligible discrepancies of the correlation coefficient from unity are observed for some combinations of structural response data. For the sake of brevity, the focus is placed on the fault detection outcome of the sensor node on the third story, which shows the highest correlation to the rest of the sensor nodes. To determine the size of the training data, several trials are conducted for sizes ranging from 200 to 2000 data points. It is observed that while increasing the size of training data improves the approximation accuracy, large data sizes may induce overfitting problems and

prohibitively increase the computational cost, which may be detrimental to the efficiency of the testing phase as well. From the trials, a trade-off between accuracy and computational efficiency at $n = 700$ data points for the training data is established. The training phase ends with the calculation of $R^2 = 0.99$, which is validated by additional 2000 training data.

As mentioned previously, sensor faults are classified in different types. It is, therefore, of interest, to observe the ability of the embedded SVR algorithm to detect different types of faults. To this end, two different fault types are simulated: bias and gain, as shown in Figure 3. Bias is simulated by shifting data by a constant value. The comparison between virtual sensor outputs obtained by the embedded SVR algorithm and the actual sensor outputs yields $R^2 = 0.93$ and $R^2 = 0.29$ for bias values of $+0.1g$ and $+0.2g$, respectively. Gain is simulated by introducing a scaling factor to the data. Two gain factors are introduced, 125% and 150% returning R^2 values of 0.95 and 0.87, respectively. Evidently, the FD-SVR approach is capable of detecting even small faults; however, the computational efficiency of the approach depends on the severity of the fault, with larger faults being more easily detectable.

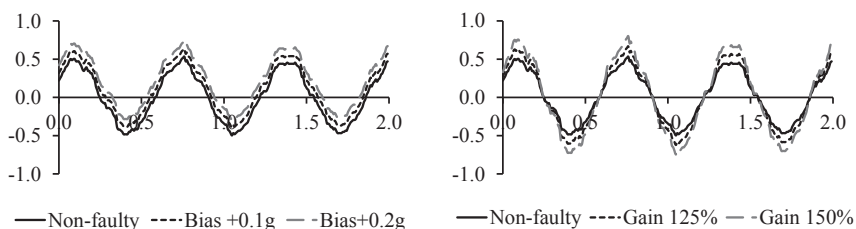


Fig. 3: Acceleration response data overlapped with different bias and gain values.

4 Summary and conclusions

In wireless SHM systems, fault diagnosis is of increasing importance due to the frequent unavailability of raw data, as a result of wireless sensor nodes processing data on board and communicating only the results of SHM tasks. In this paper, a decentralized analytical redundancy approach based on support vector regression, referred to as “FD-SVR approach”, for autonomous sensor fault detection and isolation in wireless SHM systems has been presented. Specifically, fault detection is performed on board wireless sensor nodes based on information inherently redundant in SHM systems, which is utilized to produce virtual sensor outputs that are compared to actual sensor outputs. The FD-SVR approach has been implemented into a prototype wireless SHM system, comprising wireless sensor nodes, a base station and a host computer, and it has been validated through laboratory tests on a four-story shear frame structure. Upon training the SVR algorithm with structural response data, which is assumed being non-faulty data, the SVR algorithm has been embedded into the sensor nodes. Subsequently, the SVR algorithm has been validated with two simulated sensor faults. The test results have demonstrated that the FD-SVR approach presented in this paper enables computationally efficient and accurate fault detection and isolation, for the fault types bias and gain even for small faults, which are hard to be detected. Further research will focus on the influence of other sensor faults on the FD-SVR approach and on other stages of fault diagnosis, such as fault identification.

Literature

- BASIRAT, A. H. & KHAN, A. I. (2009), Graph neuron and hierarchical graph neuron, novel approaches toward real time pattern recognition in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, Leipzig, Germany, 21/06/2009.
- DRAGOS, K. & SMARSLY, K. (2015), A comparative review of wireless sensor nodes for structural health monitoring. In: Proceedings of the 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Turin, Italy, 01/07/2015.
- DRAGOS, K. & SMARSLY, K. (2016), Distributed adaptive diagnosis of sensor faults using structural response data. In: Smart Materials and Structures, 25 (10): 105019.
- DEBIKE, Y. B., VELICKOV, D. S., SOLOMATINE, D. & ABBOTT, M. B. (2001), Model induction with support vector machines: introduction and applications. In: ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, 15 (3): 208-216.
- FORRESTER, A. I. J., SOBESTER, A. & KEANE, A. J. (2008), Engineering design via surrogate modelling: a practical guide. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Ltd.
- KRAEMER, P. & FRITZEN, C. P. (2007), Sensor fault identification using autoregressive models and the mutual information concept. In: Key Engin. Materials, 347: 387-392.
- KUHN, H. W. & TUCKER, A. W. (1950), Nonlinear programming. In: Proceedings of the 2nd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, CA, USA, 31/07/1950.
- LYNCH, J. P., FARRAR, C. R. & MICHAELS, J. E. (2016), Structural health monitoring: Technological advances to practical implementations. In: Proceedings of the IEEE, 104 (8): 1508-1512.
- MOORE, E. F. & SHANNON, C. E. (1956), Reliable circuits using less reliable relays. In: Journal of the Franklin Institute, 262 (3): 191-208.
- NETER, J., KUTNER, M. H., NACHTSHEIM, C. J. & WASSERMAN, W. (1996), Applied linear statistical models. Burr Ridge, IL, USA: Irwin Professional Publishing.
- QIN, S. J. & LI, W. (1999), Detection, identification, and reconstruction of faulty sensors with maximized sensitivity. In: Journal of American Institute of Chemical Engineers, 45 (9): 1963-1976.
- SCHÖLKOPF, B. & SMOLA, A. J. (2002), Learning with Kernels. Cambridge, MA, USA: The MIT Press.
- SMARSLY, K. & LAW, K. H. (2014), Decentralized fault detection and isolation in wireless structural health monitoring systems using analytical redundancy. In: Advances in Engineering Software, 73 (2014): 1-10.
- SMARSLY, K. & PETRYNA, Y. (2014), A decentralized approach towards autonomous fault detection in wireless structural health monitoring systems. In: Proceedings of the 7th European Workshop on Structural Health Monitoring 2014, Nantes, France, 08/07/2014.
- VON NEUMANN, J. (1956), Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components. In: SHANNON, C. E. & MCCARTHY, J. (eds.), Automata Studies. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 43-98.
- WILLSKY, A. S. (1976), A survey of design methods for failure detection systems. In: Automatica, 12: 601-611.

Generierung eines Tragwerkmodells basierend auf IFC-Daten für geschädigte Brücken

Al-Hakam Hamdan

Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · 01062 Dresden ·

E-Mail: Al-Hakam.Hamdan@tu-dresden.de

Zur Integrierung von BIM in der Tragwerksplanung und -analyse für Brücken wurde ein Konzept entwickelt, das aus den Entwurfsdaten eines IFC-Modells ein statisches System generiert. Hierbei werden die Proxy-Klassen eines zuvor erstellten Brückenmodells mittels Annotation semantisch angereichert, wodurch statisch relevante Entitäten identifiziert werden können. Es wurde ein Software-Prototyp entwickelt, der die Annotationen verwertet und Alignment-Objekte zur Repräsentation der Trasse, sowie ein Tragwerksystem generiert. Zur Analyse von geschädigten Brücken können Daten aus einem separaten Schadensmodell hinzugefügt werden. Ebenso werden weitere Parameter, die sich nicht aus IFC herleiten lassen, manuell in das Modell integriert, wie z. B. Lastdaten oder mechanische Querschnittswerte.

Keywords: Structural Analysis Model, IFC, Bridge, Mapping, Defect

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Während des Lebenszyklus von Brücken führen verschiedene Einflüsse zu Materialschädigungen, die sich auf das statische System auswirken und somit die Tragfähigkeit des Bauwerks beeinflussen. Um eine sichere Fortsetzung der Nutzung einer geschädigten Brücke zu gewährleisten, muss deren Tragwerk unter Berücksichtigung aufgetretener Schäden neu analysiert werden. Zur Modellierung dieser Schäden existieren verschiedene Verfahren wie z. B. das verschmierte und diskrete Risskonzept in der Finiten-Elemente-Methode (FEM) oder die Definition nicht effektiver Flächen im Querschnitt bei Stabtragwerken. Üblicherweise wird hierfür ein entsprechendes Tragwerksmodell manuell erstellt, das auf den verfügbaren Entwurfs- und beobachteten Verhaltensinformationen der Brücke basiert. Obwohl es bereits für diverse Statik-Software Schnittstellen für die Industry Foundation Classes (IFC), den offenen Standard des Building Information Modelling (BIM), gibt, ist eine automatisierte Transformation von Entwurfsmodellen in idealisierte Tragwerksmodelle nur begrenzt möglich. Dies liegt zum einen an einer zurzeit noch fehlenden IFC-Unterstützung von Brückenelementen, wodurch eine Modellierung dieser nur über den Einsatz von Proxy-Elementen möglich ist. Zum anderen müssen fehlende Informationen im Entwurf, wie z. B. Lagerung oder Gelenke hergeleitet werden, die im Statik Modell zwingend erforderlich sind. Im Rahmen des Forschungsprojektes wiSIB (Projektnummer 01|S16031C) wurde hierzu eine Methode entwickelt, die eine Generierung von Tragwerksmodellen für die IFC-Erweiterung Structural Analysis Model (ST4) basierend auf Daten von proxybasierten IFC-Brückenmodellen ermöglicht. Es wurde dafür ein Software-Prototyp erstellt, der die Methode an Beispielmolellen anwendet.

1.2 Stand der Technik zur BIM-Modellierung geschädigter Brücken

Trotz einiger Forschungsunternehmungen wie z.B. dem französisch-japanischen IFC-Bridge Projekt (YABUKI, et al., 2006) oder BrIM (CHIPMAN, et al., 2016), unterstützt der offizielle IFC-Standard bislang noch keine Brückenmodellierung. Aus diesem Grund wurde mit der Unterstützung von buildingSMART und zahlreicher internationaler Verkehrsministerien das Standardisierungsprojekt IFC-Bridge gestartet (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2016), bei dem auch Ergebnisse früherer Projekte integriert werden (MARKIČ, 2017). Hauptmerkmal jener IFC-Erweiterungskonzepte sind neben den neu eingeführten Objekten zur Repräsentation von Brückenbauteilen, auch die Möglichkeit die Trassierung bzw. Brückenausrichtung über sogenannte Alignment-Entitäten zu modellieren, die bereits zuvor nach Abschluss des Projektes IFC Alignment als buildingSMART Final Standard akzeptiert wurden (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2015).

Obwohl IFC-Bridge die Repräsentation räumlicher und physikalischer Merkmale einer Brücke erlaubt, werden inspektionsspezifische Details bestehender Bauwerke, wie z.B. Zustandsbewertungen, Instandsetzungshistorie oder Schadensbilder nicht berücksichtigt (KASIREDDY, et al., 2015). Diese Problematik liegt nicht nur bei IFC-Bridge vor, sondern betrifft den gesamten IFC-Standard. Erste Lösungsansätze wurden von (ABUDAYYEH, et al., 2004) in Form eines Datenmodells zur Inspektion von Massivbrücken entwickelt, sowie von (HAMMAD, et al., 2006) ein modellbasiertes Brückenmanagementsystem für mobile Endgeräte zur Verwaltung von Inspektionsinformationen. Allerdings unterstützen beide Ansätze die IFC-Datenstruktur nicht bzw. nicht vollständig. Im Rahmen des Projektes SeeBridge wird eine IFC-Erweiterung entwickelt, die die Modellierung von Brückenschäden unterstützt und in einem Software-Prototypen verarbeitet (SACKS, et al., 2018). Ebenso wurde in vorherigen Arbeiten des Projektes wiSIB ein generisches Schadensmodell entwickelt, welches auf die Modellierung von Schäden in der Tragwerksanalyse und Simulation abzielt (HAMDAN, et al., 2018). Letzteres ist ein eigenständiges Modell, welches unter Verwendung des Multimodell-Ansatzes (FUCHS, 2015) mit einem BIM-Modell verknüpft werden kann.

1.3 Stand der Technik zur Tragwerksmodellierung in BIM

Um die Modellierung von Tragwerken in IFC zu unterstützen, wurde die Erweiterung ST4 veröffentlicht, die sowohl die Erstellung von Stab- als auch Flächentragwerken ermöglicht (ISO 16739:2013, 2013). ST4 deckt hierbei leider nicht alle Bereiche der Tragwerksanalyse ab. So können zwar statische Tragwerke inklusive Lasten und Lagerungen modelliert werden, aber Informationen bezüglich Dynamik, Vorspannung, Stabilitätsproblemen oder eine detaillierte Beschreibung der FEM-Topologie fehlen (WEISE, et al., 2003). Statikprogramme wie RSTAB, InfoGraph oder SOFiStiK besitzen mittlerweile eine entsprechende Schnittstelle, um aus den Informationen eines IFC-Modells mit ST4 ein Eingabemodell für weitere Berechnungen zu generieren. Der Ansatz, aus den Elementen der IFC-Architekturdomäne ein ST4-Modell zu generieren, wurde von (DENG, et al., 2006) verfolgt. Da das ST4-Modell für eine spätere FEM-Analyse genutzt werden soll, werden die gemappten Daten hierbei in einem neuen XML-basierten Format gespeichert. (PAZLAR, et al., 2008) entwickelte einen IFC Modelserver, der IFC-Architekturmodelle in ST4-Modelle transformiert. Die Transformation beschränkt sich hierbei allerdings nur auf geometrische und topologische Aspekte. Eine Methode zur Generierung von Brückentragwerken basierend auf IFC-Daten ist mit den bisherigen Ansätzen nicht möglich.

2 Methode für Mapping eines IFC-Brückenmodells zu ST4

Eine nach wie vor übliche Variante der Tragwerksanalyse im Brückenbau ist die Erstellung eines Stabtragwerksystems. Für Balkenbrücken, die zu den am häufigsten vertretenen Konstruktionsarten für Brücken zählen, werden hierbei Segmente der Brücke, sowie deren Pfeiler als Stäbe erstellt und anschließend über deren Verlauf vordefinierte Querschnitte extrudiert. Die Widerlager sowie Fußpunkte der Pfeiler werden als Auflager und die Verbindungspunkte zwischen zwei Stäben als Gelenke modelliert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dieses Verfahren algorithmisch umgesetzt und somit eine Methode entwickelt, Stabtragwerke aus IFC-Modellen zu generieren. Die Ergebnisse werden dabei im verwendeten IFC-Modell unter Verwendung von ST4 gespeichert. Hierfür wurden Funktionen des IFC-Frameworks von (TAUSCHER, et al., 2018) genutzt. Die vorgestellte Methode ist für IFC-Brückenmodelle konzipiert deren Bauteile nur über Proxy-Elemente repräsentiert werden.

2.1 Workflow

Die Erstellung des Tragwerks setzt sich aus mehreren Schritten zusammen, die nicht nur die Generierung der ST4-Elemente umfassen, sondern auch die vorherige semantische Anreicherung des IFC-Modells, sowie die Herleitung der Trasse und die Ergänzung von Last- und Schadensdaten. Die Struktur dieses Ablaufs ist in Abbildung 1 dargestellt.

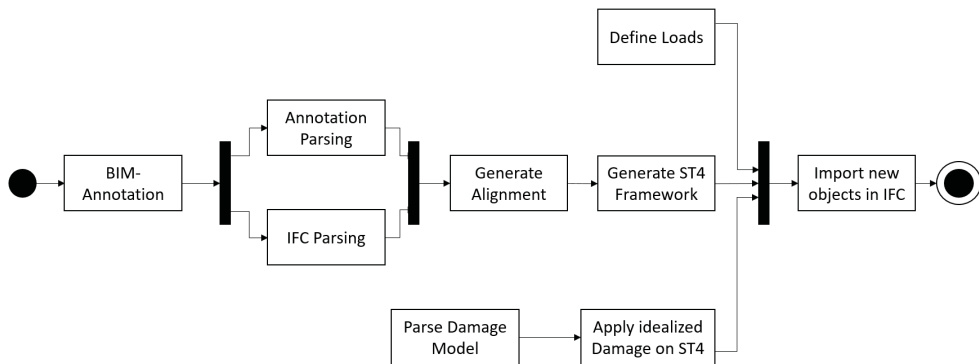


Abb. 1: Aktivitätsdiagramm zur Erstellung eines ST4-Modells in IFC

Da es derzeit nur möglich ist, IFC-Brückenmodelle mittels Proxy-Elementen zu erstellen, müssen diese zur Identifikation tragwerksrelevanter Komponenten, semantisch angereichert werden. Dies wird durch Verwendung des webbasierten Tools BIM-Annotator (ISMAIL, et al., 2016) realisiert. Nach der Verarbeitung der annotierten Daten durch zwei Parser, wird die Trasse basierend auf der Positionierung der Brückenkomponenten generiert. Anhand der Trassenkoordinaten und weiterer Annotationsdaten wird daraufhin ein Tragwerk erstellt. Abschließend werden Lastdaten dem Modell manuell hinzugefügt, sowie idealisierte Schäden aus einem zuvor erstellten Schadensmodell implementiert. Die hierbei neu erstellten IFC-Objekte werden dem bestehenden Modell hinzugefügt und exportiert.

2.2 BIM-Annotation

Zur Generierung eines Tragwerks müssen zunächst alle relevanten Bauteile der Brücke identifiziert werden. Für Stabtragwerke wären dies die Segmente des Überbaus, die tragenden Komponenten des Unterbaus, sowie die Widerlager. Hierbei wird die Anwendung BIM-Annotator (ISMAIL, et al., 2016) verwendet, die in einen IFC-Webserver integriert ist und eine Annotation von Entitäten in einer separaten Datei ermöglicht (siehe Abbildung 2). Diese Annotationen werden dann über ein Linkmodell (FUCHS, 2015) mit dem bestehenden IFC-Modell verknüpft. Aufgrund der bevorstehenden Veröffentlichung von IFC-Bridge wird auf die detaillierte Entwicklung eines Annotationsschemas verzichtet und es werden nur folgende drei Klassifikationstypen verwendet:

- IfcAbutment zur Klassifikation von Widerlagern
- IfcPier für die Klassifikation von Pfeilern
- IfcBridgeSegment zur Klassifikation von Segmenten des Überbaus

Die exportierten Annotationen bilden die Grundlage zur Erstellung des ST4-Modells.

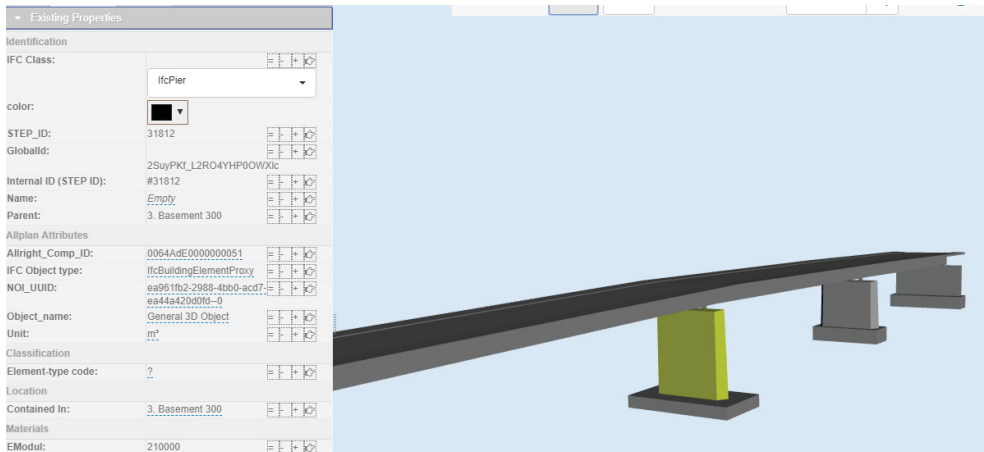
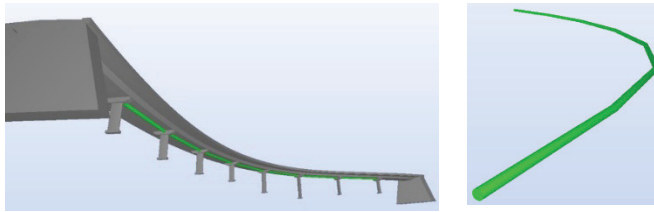


Abb. 2: Annotation eines Brückenpfeilers mittels BIM-Annotator

2.3 Erstellung der Trasse (Alignment)

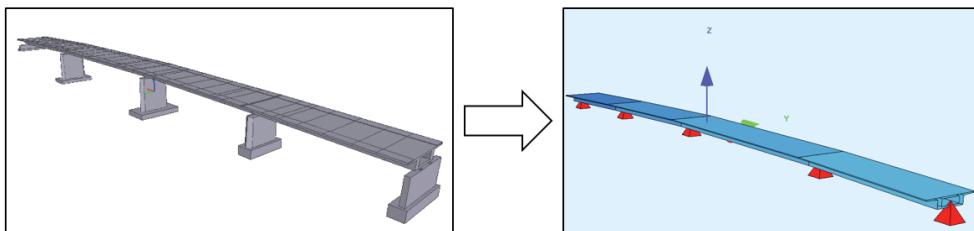
Ein wichtiges Element des Brückentragwerks ist die Trasse, die den Verlauf der Stäbe und Auflagerpositionen definiert. Es wurde ein Tool entwickelt, das eine Generierung der Trasse basierend auf den Annotations- sowie IFC-Daten ermöglicht. Hierbei wird die Position eines Widerlagers als Ausgangspunkt automatisch selektiert, von dem die Mittelpunkte der Brückensegmente sortiert nach Entfernung bis zum anderen Widerlager erfasst werden. Die resultierenden Punkte werden für die geometrische Repräsentation eines Proxy-Elementes in Form der Klasse IfcPolyline zusammengefasst. Es handelt sich bei dem Proxy-Element um einen dreidimensionalen Linienzug analog zu dem 3D-Alignment aus dem Alignment-Projekt. Zur grafischen Darstellung im IFC-Viewer wurde allerdings in Abbildung 3 das Element als Extrusionskörper dargestellt. Alternativ ist ebenfalls eine Aufteilung in ein horizontales und vertikales Alignment-Segment möglich.

**Abb. 3:**

Visualisierung der
Trasse als 3D
Alignment

2.4 ST4-Generierung

Für die Generierung der Stäbe wird `IfcStructuralCurveMember` genutzt und zur Verbindung dieser in Form von Gelenken, sowie Auflagermodellierung wird `IfcStructuralPointConnection` eingesetzt. Entitäten dieser beiden Typen werden nach deren Erstellung mit einer Instanz von `IfcStructuralAnalysisModel` über die Relation `IfcRelAssignsToGroup` verknüpft. Ebenso wird dieses über `IfcRelServicesBuilding` mit dem Brückenmodell verlinkt. Basierend auf der geometrischen Abbildung der Trasse werden die Stabelemente nacheinander erstellt und mit deren Nachfolgeelementen über ein steifes Gelenk verknüpft. Das erste und das letzte Stabelement wird hierbei mit dem Widerlager in Form eines Auflagers verknüpft. An die Position der Stützen werden weitere Auflager an die Stäbe angehängt bzw. senkrechte Stäbe mit Auflagern am Fußpunkt. Die Lagerungsbedingungen sind standardmäßig so ausgelegt, dass das System statisch bestimmt ist. Eine Modifikation dieser ist jederzeit möglich, ebenso wie die Ergänzung von Federsteifigkeiten. Jedem Stabelement wird außerdem ein Querschnittelement als `IfcProfileDef`-Element zugewiesen. Die Transformation des Querschnitts aus dem IFC-Bauteil wurde für den Software-Prototyp nur für Hohlkastenquerschnitte konzipiert. Eine Unterstützung für andere Querschnittsarten ist prinzipiell möglich, erfordert aber je nach Typ andere Transformationsalgorithmen.

**Abb. 4:** Transformation des IFC-Brückenmodells in ST4 (importiert in SOFiSTiK)

2.5 Schadensmodellierung

Die Modellierung von Schäden am Stabtragwerk nutzt Methoden, die auf dem verschmierten Risskonzept beruhen. Hierbei werden Materialparameter im geschädigten Bereich über Abminderungsparameter reduziert, um das Wirkverhalten von Schäden näherungsweise zu beschreiben. Die Schäden werden vorab in dem generischen Schadensmodell von (HAMDAN, et al., 2018) als geschädigte Bereiche definiert, denen z.B. eine entsprechende Steifigkeitsmatrix mit Abminderungsparameter zugewiesen wird. Bei einer kompletten Steifigkeit von null werden die Schäden als Fehlstellen erkannt, wie es bei Abplatzungen

oder großen Risschädigungen auftreten kann. Diese Bereiche können daraufhin über den Einsatz nichteffektiver Flächen (SOFISTIK, 2016) simuliert werden. Ebenso ist es möglich Querschnittswerte von Bauteilen zu reduzieren, sowie Schäden durch die Ausprägung von Fließgelenken zu modellieren (MENN, 1986). Letzteres ist jedoch eine stark vereinfachte Modellierung, die nur bei stark vorangeschritten Schäden eingesetzt werden sollte. Momentan wird die Modellierung von Schäden in IFC nicht unterstützt. Somit ergeben sich zwei Möglichkeiten der Implementierung. Zum einen können die Schäden unter Verwendung von Ersatz-Klassen in IFC erstellt werden, wie z.B. als `IfcElementAssembly` (SACKS, et al., 2018) oder `IfcProxy`. Zum anderen können die Schadensdaten extern über ein Linkmodell nach dem Multimodell-Ansatz von (FUCHS, 2015) mit dem BIM-Modell verknüpft und während des Mapping-Prozesses im Statik-Modell implementiert werden. Während der Ansatz der IFC-Implementierung den Vorteil hat, dass die Schadenselemente über gängige Viewer visualisiert werden können, unterstützt der Multimodell-Ansatz die Versionierung der Schäden mit Hilfe eines implementierten Archivs, in dem frühere Versionen der Elemente abgespeichert und einander zugeordnet, sowie ein Schadensverlauf rekonstruiert werden kann (HAMDAN, et al., 2018). Im Rahmen des Forschungsprojektes wiSIB wird der Multimodell-Ansatz verfolgt und ein Erweiterungsmodul des vorgestellten Mapping-Prototyps zur automatisierten Modellierung von Schäden in der Statik-Software von SOFiSTiK befindet sich zurzeit in Entwicklung.

2.6 Ergänzung weiterer Eingabeparameter

Für eine Tragwerksanalyse werden neben den Schadensinformationen noch weitere Daten benötigt, die sich ebenfalls nicht aus dem Entwurfsmodell über ST4-Transformation gewinnen lassen. Hauptsächlich handelt es sich hierbei um Lastdaten, die nachträglich ergänzt werden müssen, entweder manuell über eine entsprechende Benutzeroberfläche oder automatisch über den Import von Monitoringdaten aus dem Brückenbauwerk. Diese können in ST4 über die Verwendung der Unterklassen von `IfcStructuralActivity` modelliert werden. Desweiteren sollten mechanische Querschnitseigenschaften, wie z.B. der Torsionsträgheitsmoment oder der Schwerpunkt definiert werden. Die Anwendung einer Transformation zu einem vollständig einsetzbaren Stabtragwerksmodell kann somit momentan nur halb-automatisiert durchgeführt werden.

3 Problemanalyse

Trotz der erfolgreichen Ausführung einer halbautomatisierten Transformation eines Entwurfsmodells in IFC zu ST4, ist dieser Prozess momentan nicht grundsätzlich problemfrei, sondern an gewisse Randbedingungen geknüpft. Momentan wird die Querschnittstransformation nur für Überbausegmente unterstützt, deren Geometrie in IFC über die Klasse `IfcFacetedBrep` definiert ist, dem Geometriotyp, der in der Regel auch für Proxys im IFC-Export von Revit genutzt wird. Ebenso müssen die Randflächen des Querschnitts aus einer Außen- und Innenfläche bestehen, sodass ein Hohlkasten definiert wird. Die getesteten Modelle, die in Autodesk Revit erstellt und als IFC-Modell exportiert worden waren, konnten hierbei alle erfolgreich transformiert werden, wenn es sich beim Querschnitt um ein Hohlkastenprofil handelte. Außerdem ist das vorgestellte Konzept auf den Konstruktionstyp der Balkenbrücke spezifiziert, wodurch das Mapping anderer Systeme zu Problemen oder fehlerhaften Ergebnissen führen kann. So werden z.B. Fachwerke, Bogen-

oder Hängebrücken nicht korrekt transformiert, da das zugrunde liegende Tragwerkssystem anders deklariert ist. Ein universal einsetzbares Software-System, erfordert somit eine geeignete Differenzierung der existierenden Konstruktionstypen und Tragwerksysteme, sowie eine daraus resultierende Abwandlung der Mapping-Methode.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Artikels wurde ein Ansatz für die Transformation des Entwurfmodells einer geschädigten Brücke zu einem Tragwerksmodell präsentiert. Es wurde für ein mittels Annotationstool semantisch angereichertes Brückeninformationsmodell eine Applikation zur Generierung eines Trassenelementes basierend auf der Erweiterung des Alignment-Projektes entwickelt, das eine darauffolgende Transformation der Brückendaten zu Elementen der IFC-Erweiterung ST4 ermöglicht. Dies wurde in einem Software-Prototypen realisiert, der momentan noch auf Balkenbrückensysteme mit Hohlkastenprofil als Querschnittstyp spezifiziert ist. Anschließend können Schadensdaten aus einem mit dem BIM-Modell verlinkten Schadensmodell in das resultierende Tragwerkssystem implementiert werden, sowie weitere Parameter die für eine Berechnung erforderlich sind, wie z.B. Lastdaten oder mechanische Querschnittswerte. Das System wurde an Brückenmodellen getestet und sowohl das Alignment, als auch das Tragwerkssystem konnten korrekt generiert werden. Ein zusätzliches Software-Tool zur Verlinkung der Schadensdaten und eine Schnittstelle zur Eingabe von weiteren Parametern bzw. Herleitung dieser befinden sich im Rahmen des Projektes wiSIB noch in Entwicklung. Die automatisierte Transformation von Entwurfsdaten zu tragwerksrelevanten Daten ist ein essentieller Schritt zur Etablierung von BIM in der Tragwerksplanung. Ebenso ist es eine Voraussetzung für weitere Methoden der Brückenbewertung z.B. im Bereich des Monitoring oder der Systemidentifikation, wodurch eine statische Analyse mit Abgleich von Sensordaten automatisch in Echtzeit durchgeführt werden könnte.

Diese Forschungsarbeit wurde mit der Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch die Förderung des Projektes wiSIB (Projektnummer 01|S16031C) ermöglicht.

Literatur

- ABUDAYYEH, OSAMA, AL BATAINEH, MOHAMMED UND ABDEL-QADER, IKHLAS. 2004. An imaging data model for concrete bridge inspection. *Advances in Engineering Software*. 2004, 35.
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. 2016. [Online] 27. Oktober 2016. [Zitat vom: 7. Juni 2018.] <https://www.buildingsmart.de/kos/WNetz?art=News.show&id=524>.
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. 2015. IFC Alignment. [Online] 29. Juli 2015. [Zitat vom: 7. Juni 2018.] <http://www.buildingsmart-tech.org/infrastructure/projects/alignment>.
- CHIPMAN, TIM, et al. 2016. Bridge Information Model Standardization. s.l. : U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2016. FHWA-HIF-16-011.

- DENG, XUE YUAN UND CHANG, TSE-YUNG P. 2006. Creating Structural Model From IFC-Based Architectural Model. Montréal, Kanada : Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, 2006.
- FUCHS, SEBASTIAN. 2015. Erschließung domänenübergreifender Informationsräume mit Multimodellen. Dresden : Institut für Bauinformatik, Fakultät Bauingenieurwesen, TU Dresden, 2015.
- HAMDAN, AL-HAKAM UND SCHERER, RAIMAR JOSEPH. 2018. A Generic Model for the Digitalization of Structural Damage. Ghent : IALCCE 2018, 2018.
- HAMMAD, AMIN, et al. 2006. Mobile Model-Based Bridge Lifecycle Management System. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 21, p. 530-547. 2006.
- ISMAIL, ALI, et al. 2016. Semantic Enrichment and Multimodel Data Exchange Approach for CFD Analysis of Bridges. s.l. : EG-ICE 2016, 2016.
- ISO 16739:2013. 2013. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Geneva : ISO/TC 184/SC 4, 2013.
- KASIREDDY, VARUN UND AKINCI, BURCU. 2015. Towards the Integration of Inspection Data with Bridge Information Models to Support Visual Condition Assessment. Pittsburgh : International Workshop on Computing in Civil Engineering, 2015.
- MARKIČ, ŠTEFAN. 2017. IFC-Bridge: Previous Initiatives and Their Proposals. Dresden : Forum Bauinformatik 2017, 2017.
- MENN, CHRISTIAN. 1986. Ermittlung der Schnittkräfte. Stahlbetonbrücken. Wien : Springer Verlag, 1986, S. 90-99.
- PAZLAR, T., KLINC, R. UND TURK, Z. 2008. Mapping between architectural and structural aspects in the IFC based building information models. s.l. : eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM, 2008.
- SACKS, RAFAEL, et al. 2018. SeeBridge as next generation bridge inspection: Overview, Information Delivery Manual and Model View Definition. Automation in Construction. 2018, 90.
- SOFISTIK. 2016. AQUA - Materialien und Querschnitte. 2016.
- TAUSCHER, EIKE UND THEILER, MICHAEL. 2018. apstex IFC Framework. [<http://www.apstex.com/>] Weimar : s.n., 2018.
- WEISE, MATTHIAS, et al. 2003. Structural analysis extension of the IFC modeling framework. Electronic Journal of Information Technologies in Construction. 2003, ITcon 14.
- YABUKI, NOBUYOSHI, et al. 2006. International Collaboration for Developing the Bridge Product model "IFC-Bridge". Montréal, Canada : Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, 2006.

Quality indicators for embedded stochastic subspace identification algorithms in wireless structural health monitoring systems

Stalin Ibáñez and Kosmas Dragos

Chair of Computing in Civil Engineering · Bauhaus University Weimar, Germany
E-Mail: stalin.patricio.ibanez.sanchez@uni-weimar.de

Operational modal analysis (OMA) has been increasingly adopted for system identification in structural health monitoring (SHM). OMA is typically performed by processing structural response data either in the time domain or in the frequency domain. A time domain method that has received considerable attention in recent years, owing to its accuracy in yielding mode shapes, is the stochastic subspace identification (SSI). Moreover, due to the trend being directed in recent years towards wireless technologies in SHM, embedded algorithms performing SSI on board wireless sensor nodes have been proposed. Despite the promising results from embedded SSI algorithms, attention needs to be drawn to the efficiency of the embedded algorithms due to the inherent constraints of wireless sensor nodes in terms of power autonomy and memory management. Furthermore, the efficiency of the algorithms needs to be addressed in the context of quality control. The preliminary step towards quality control of embedded SSI, which is identifying the parameters of the process that could serve as quality indicators, is discussed in this paper. Specifically, an SSI algorithm is designed and implemented into a prototype wireless SHM system. Subsequently, a series of laboratory tests are performed and the “key process variables”, i.e. variables related to the implementation of the algorithm (e.g. battery consumption) that could serve as quality indicators, are identified. The paper concludes with a discussion on the quality indicators identified and with an outlook on further steps towards quality control of embedded algorithms.

Keywords: Quality control, structural health monitoring, stochastic subspace identification, operational modal analysis, wireless sensor nodes, embedded computing

1 Introduction

Structural health monitoring (SHM) is a field that receives increasing attention in civil engineering. SHM is associated with collecting data from structures to obtain information on structural states. Data collection can be performed by means of cable-based sensor networks or wireless sensor networks. Wireless sensor networks for SHM are composed of wireless sensors nodes, which are cheaper and easier to install than cable-based sensors (PENTARIS et al. 2013). One challenge of wireless sensor networks is managing battery consumption, which can be alleviated using embedded computing.

Embedded computing in wireless sensor nodes has been utilized for performing a variety of monitoring tasks (SMARSLY 2011). For example, embedded algorithms have been proposed for detection and correction of synchronization problems in wireless SHM systems (DRAGOS & SMARSLY 2017a) and for decentralized condition assessment using partial numerical models (DRAGOS & SMARSLY 2017b). Regarding safety in structures, cable force estimation using wireless sensors have been studied (CHO et al. 2008), damage detection has been exposed

(LYNCH et al. 2004), and vibration control have been reported (JEONG et al. 2017). In the field of system identification, embedded computing has been utilized for obtaining information on structural properties (KIM & LYNCH 2012, DRAGOS & SMARSLY 2015, 2016).

In SHM, structural states can be evaluated by means of modal identification. There are various methodologies for performing modal identification; however, in existing structures the most common method is operational modal analysis (OMA). It can be performed without interrupting normal operations of structures and can process structural response regardless of the input data. OMA can be done using algorithms that are divided into frequency domain methods and time domain methods. Frequency domain methods transform time signals into the frequency domain, usually via fast Fourier transform (COOLEY & TUKEY 1965), while time domain methods use the time domain data, e.g. by means of covariance. OMA have been applied in SHM systems in form of algorithms using embedded computing.

Several researchers have developed embedded algorithms implementing OMA methods into wireless SHM systems. The use of peak picking (PP), frequency domain decomposition (FDD), and random decrement (RD) algorithms for detecting modal properties automatically has been reported by ZIMMERMAN et al. (2008). The stochastic subspace identification (SSI) algorithm has been implemented in a wireless SHM system by CHO et al. (2015), testing the use of sensor nodes clustering and by validating the approach through laboratory tests. Additionally, CHO et al. (2008) have presented three smart wireless SHM systems used for modal identification through modified FDD and PP, which have been validated via field tests on a balcony structure in a historic theater and via testing a scaled laboratory cable-stayed structure. Moreover, LE CAM et al. (2013) has applied an embedded SSI algorithm into the PEGASE platform obtaining good correlation between the onboard results and the results of a centralized data analysis. While the aforementioned studies have used various algorithms for embedded OMA, the quality of embedded algorithms has not been adequately addressed yet.

This paper presents preliminary steps towards quality control of embedded algorithms by identifying parameters that could serve as quality indicators. For identifying the quality indicator parameters, a prototype wireless SHM system equipped with embedded SSI algorithms is exemplarily developed. Specifically, an algorithm for implementing the SSI-Cov, which is a variant of SSI based on the covariance between structural response data sets, is devised and embedded into the prototype wireless SHM system. The wireless SHM system is installed in a laboratory test structure, and a series of tests are performed, varying one input parameter of the SSI-Cov method in each test. From the test results, conclusions are drawn onto which parameters are important for investigating the quality of embedded algorithms.

2 Stochastic subspace identification for OMA

The SSI-Cov method is derived from the state-space model representation of the equation of motion of a linear-invariant multi degree of freedom system. The continuous state-space model is shown in equation (1).

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_c \mathbf{u}(t) \quad (1a)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_c \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_c \mathbf{u}(t) \quad (1b)$$

where \mathbf{A}_C is the system matrix, $\dot{\mathbf{x}}(t)$ is the derivative of the state vector, \mathbf{B}_C is the input matrix and defines the spatial distribution of m inputs from the input vector $\mathbf{u}(t)$. The matrices \mathbf{C}_C and \mathbf{D}_C are the output matrix and direct transmission matrix, respectively, and define the output vector $\mathbf{y}(t)$. From the continuous state-space model, the stochastic subspace model is derived (VAN OVERSCHEE & DE MOOR 1996) and the relation between the correlation matrix of the structural response data and the system matrix is found, as shown in equation (2).

$$\mathbf{R}_j = \mathbf{C} \mathbf{A}^{j-1} \mathbf{G} \quad (2)$$

where \mathbf{C} is equal to \mathbf{C}_C and \mathbf{G} is the correlation between the state and the output vectors. Matrix \mathbf{A} represents the discrete system matrix and is derived from \mathbf{A}_C . The output covariance sequence \mathbf{R}_j , estimated from structural response data, is related with the state-space matrix \mathbf{A} of the discrete state-space model; therefore, it is possible to calculate \mathbf{A} from structural response data.

The modal parameters of the system can be obtained from matrix \mathbf{A}_C , using the eigendecomposition, i.e. the decomposition into eigenvalues and eigenvectors, shown below:

$$\mathbf{A}_C = \mathbf{\Psi} \mathbf{\Lambda}_C \mathbf{\Psi}^{-1} \quad (3a)$$

$$\mathbf{\Lambda}_C = \begin{bmatrix} \mathbf{\Lambda} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{\Lambda}^* \end{bmatrix} \quad \mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Theta} & \mathbf{\Theta}^* \\ \mathbf{\Theta} \mathbf{\Lambda} & \mathbf{\Theta}^* \mathbf{\Lambda}^* \end{bmatrix} \quad (3b)$$

$$\mathbf{\Lambda}_C = \begin{bmatrix} \ddots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \lambda_k & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \ddots \end{bmatrix} \quad \mathbf{\Theta} = [\dots \quad \phi_k \quad \dots] \text{ for } k=1, \dots, n_2 \quad (3c)$$

In equation (3), $\mathbf{\Psi}$ and $\mathbf{\Lambda}_C$ are the matrices containing the eigenvectors and eigenvalues, respectively, from the eigendecomposition of \mathbf{A}_C . The eigenvalues are λ_k and the eigenvectors are ϕ_k . The notation \bullet^* denotes complex conjugate. Since the matrix $\mathbf{\Psi}$ contains all the eigenvectors measured (physical and non-physical), the corresponding mode shapes $\mathbf{\Phi}$ are selected using the matrix \mathbf{C}_C :

$$\mathbf{\Phi} = \mathbf{C}_C \mathbf{\Psi} \quad (4)$$

The covariance function is calculated from an infinite number of structural response data points. Since there are only a finite number of structural response data points \mathbf{y}_k , the covariance function considered is essentially an estimated covariance $\hat{\mathbf{R}}$ (pseudo covariance):

$$\hat{\mathbf{R}}_j = \frac{1}{n_t - j} \sum_{k=0}^{n_t - j - 1} \mathbf{y}_k \mathbf{y}_{k+j}^T \quad \text{for } j=1, \dots, j_m \quad (5)$$

Values calculated for $\hat{\mathbf{R}}$ are arranged in a Toeplitz matrix, which is a diagonal-constant matrix. The dimension of the Toeplitz matrix represents the order of the SSI-Cov method. Further details on the mathematical background of SSI-Cov are described in VAN OVERSCHEE & DE MOOR (1996).

3 Implementation into a prototype wireless SHM system

The implementation of the SSI-Cov method in an algorithm embedded into a prototype wireless SHM system, which consists of wireless sensor nodes and a gateway sensor connected to a server (i.e. a computer), is illustrated in Figure 1. First, all sensor nodes are started and set ready to communicate with the server. Then, the sensor nodes are synchronized and structural response data is collected. Next, one sensor node used as reference sends the structural

response data to the rest of the sensor nodes, which receive the data and perform baseline correction. Subsequently, each sensor node uses the structural response data locally collected and the structural response data of the reference sensor node for applying the SSI-Cov algorithm for several orders, i.e. varying the size of the Toeplitz matrix; the solutions are stored locally in each sensor node. Then, from the solutions stored locally each sensor node finds the stable eigenfrequencies and mode shapes, which means finding the values that represent the physical behavior of the structure. Finally, the eigenfrequencies and mode shapes are sent to the server.

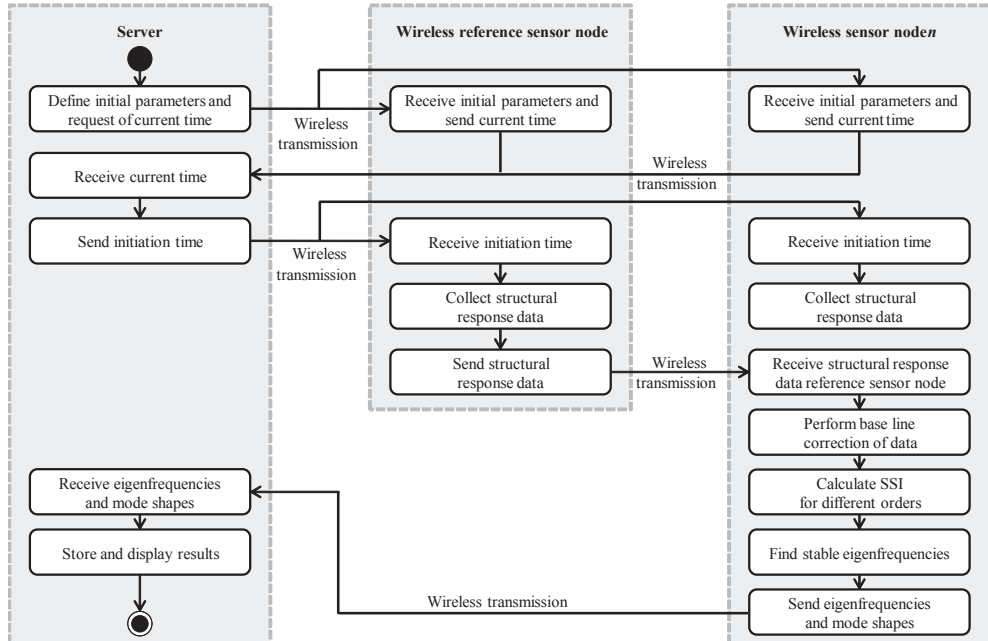


Fig. 1: Overview of the wireless SHM system

4 Laboratory tests and results

In this section, the performance of the embedded algorithm implementing the SSI-Cov method is analyzed by means of laboratory tests. The tests are devised for varying input parameters of the SSI algorithm and analyzing the results of memory usage and battery consumption.

4.1 Experimental setup

The laboratory tests are conducted using a four-story shear frame structure. The structure height is 1200 mm, in which each floor is composed by an aluminum plate of 300 mm length and 200 mm width. The columns, with cross sections of 2 mm × 20 mm, are connected to each story using bolts. The columns are connected at the base to a block, ensuring fixed supports. Each story has a sensor node of type Oracle SunSPOT (ORACLE CORP. 2009) placed

at the center of the plate. Each sensor node is equipped with a triaxial digital output accelerometer and with a temperature sensor. The laboratory structure is shown in Figure 2.

4.2 Description of the laboratory tests

A series of tests are conducted using the laboratory structure. In each test, one input parameter of the SSI-Cov method is varied to investigate the effect of the parameter in question on the performance of the embedded SSI-Cov algorithm. The input parameters considered are:

- Sampling frequency: 50 Hz, 100 Hz, and 125 Hz
- Length of structural response data sets: 500, 1000, and 2000 data points
- Maximum order of the SSI-Cov algorithm: 26, 36, and 42



Fig. 2:

Laboratory structure

Battery consumption and memory usage from each sensor node are retrieved and studied as potential quality indicators. The sensor node placed at the roof of the laboratory structure is that sensor node, which is used as the reference for the embedded SSI-Cov algorithm in all tests.

4.3 Tests results and discussion

The tests results are grouped according to the quality indicator studied. Figure 3 shows the variation of memory usage when varying each of the input parameters of the SSI-Cov method. The corresponding results of the battery consumption are illustrated in Figure 4.

The results from Figure 3 show a decreasing trend of the memory usage for shorter data set lengths; however, the results are too dispersed in the case of 1000 data points. Similarly, when the SSI order increases, the memory usage, in general, increases as well, but results do not show a strong convergence. In the case of sampling frequency variation, there is no visible trend.

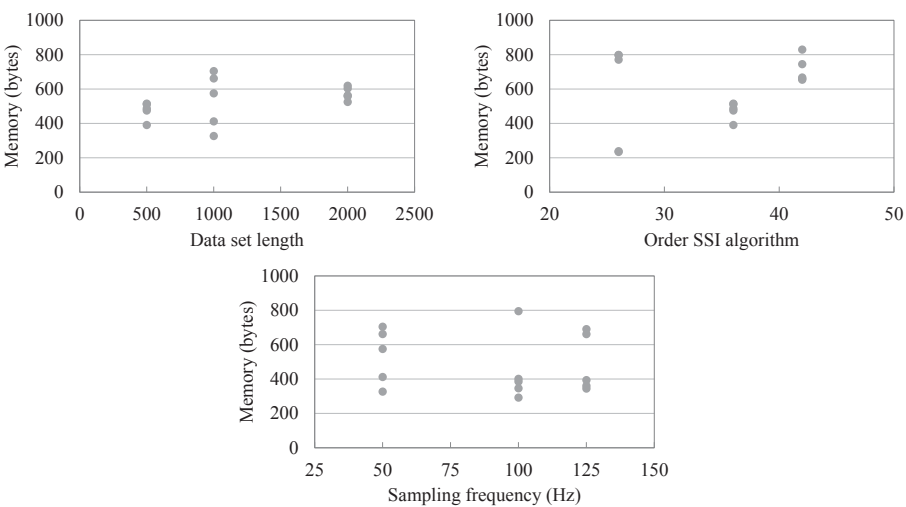


Fig. 3: Memory usage for each of the SSI-Cov input parameters

The lack of clear trends with respect to memory usage is attributed to the stochastic nature of the algorithm. The size of the identification matrix, i.e. the Φ matrix, depends on the frequencies identified. Thus, for the same input parameters, but using different structural response data, each test will have different memory usage.

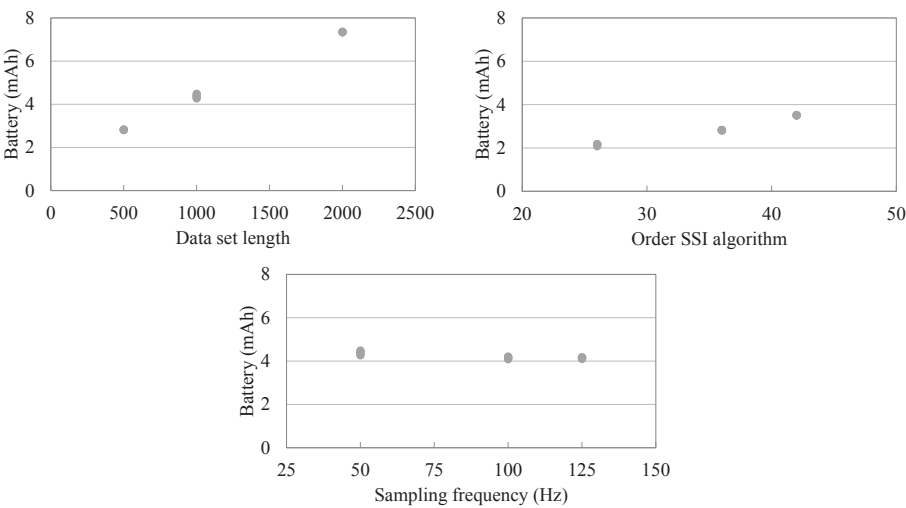


Fig. 4: Battery consumption for each of the SSI-Cov input parameters.

From Figure 4 it is evident that longer data sets are associated with an increasing trend in battery consumption, which is also the case for increasing SSI order. When increasing the

sampling frequency, the battery consumption is reduced; however, the variation is relatively low and the consumption can be considered as constant.

From the test results it is clear that varying the input parameters of the SSI-Cov method has a noticeable and quantifiable effect on the performance of the embedded SSI-Cov algorithm, as reflected in memory usage and battery consumption. It is therefore concluded that performance metrics of embedded computing, such as battery consumption and memory usage, serve as reliable indicators for conducting quality control of embedded algorithms in wireless SHM systems.

5 Summary and conclusions

In recent years, engineering structures have been increasingly investigated to determine their current structural states. There are several methods to investigate the properties of structures, which are normally classified into destructive testing methods and non-destructive testing (NDT) methods. Among the NDT methods, structural health monitoring is frequently used, and it is usually performed by collecting structural response data and by processing the data to extract conclusions about structural states. One method used in SHM for obtaining information on structural dynamic properties is OMA. Particularly in wireless SHM systems, the use of embedded algorithms for SHM, such as OMA algorithms, has been widespread including various algorithms, such as peak-picking, frequency domain decomposition, and stochastic subspace identification. However, investigating the quality of embedded algorithms has not received adequate attention. This paper has presented an investigation of quality indicators for embedded algorithms through an example of an SSI-Cov algorithm embedded into a prototype wireless SHM system.

The parameters that could serve as quality indicators of the embedded algorithm have been studied through laboratory tests using a shear frame structure, by varying input parameters of the SSI-Cov method in each test. The results of the laboratory tests have shown that the parameters considered, i.e. the memory usage and the battery consumption, are affected by the variation of the SSI-Cov input parameters and may serve as indicators when analyzing the quality of the embedded algorithm. Future research may focus on quantifying the quality of embedded algorithms.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support offered by the German Research Foundation (DFG) through grant SM 281/9-1. Any opinions, findings, conclusions, or recommendations expressed in this paper are those of the authors and do not necessarily reflect the views of DFG.

Literature

CHO, S., PARK, J.W. & SIM, S.H. (2015), Decentralized system identification using Stochastic Subspace Identification for Wireless Sensor Networks. *Journal of Sensors*, 15(4), 8131–8145. doi:10.3390/s150408131

- CHO, S., YUN, C., LYNCH, J., ZIMMERMAN, A., SPENCER, B.S. & NAGAYAMA, T. (2008), Smart Wireless Sensor Technology for Structural Health Monitoring of Civil Structures. *International Journal of Steel Structure*, 8(4), 267–275
- COOLEY, J.W. & TUKEY, J.W. (1965), An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*, 19 (90), pp. 297–301
- DRAGOS, K. & SMARSLY, K. (2015), Embedding numerical models into wireless sensor nodes for structural health monitoring. In: *Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM)*. Stanford, CA, USA, 09/01/2015
- DRAGOS, K. & SMARSLY, K. (2016), A hybrid system identification methodology for wireless structural health monitoring systems based on dynamic substructuring. In: *Proceedings of the SPIE Smart Structures/NDE Conference: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. Las Vegas, NV, USA, 03/24/2016
- DRAGOS, K. & SMARSLY, K. (2017a), An embedded algorithm for detecting and accommodating synchronization problems in wireless structural health monitoring systems. Presented at the 24th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE), Nottingham, United Kingdom, 10.07.2017
- DRAGOS, K. & SMARSLY, K. (2017b), Decentralized infrastructure health monitoring using embedded computing in wireless sensor networks, in: Sextos, A.G., Manolis, G.D. (Eds.), *Dynamic Response of Infrastructure to Environmentally Induced Loads*, *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. doi:10.1007/978-3-319-56136-3
- JEONG, S., CHO, S. & SIM, S.H. (2017), Integrated cable vibration control system using wireless sensors. Presented at the Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems conference, Denver, Colorado, USA, 12.04.2017
- KIM, J. & LYNCH, J.P. (2012), Autonomous Decentralized System Identification by Markov Parameter Estimation Using Distributed Smart Wireless Sensor Networks. *Journal of Engineering Mechanics*, 138(5), 478–490.
- LE CAM, V., DÖHLER, M., LE PEN, M. & MEVEL, L. (2013), Embedded Modal Analysis Algorithms on the Smart Wireless Sensor Platform PEGASE. Presented at the 9th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, USA. 10.09.2013
- LYNCH, J.P., SUNDARARAJAN, A., LAW, K.H., SOHN, H. & FARRAR, C.R. (2004), Design of a wireless active sensing unit for structural health monitoring. Presented at the 11th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, USA, 14.03.2004
- ORACLE CORP. (2009), Sun SPOT Theory of Operation, 1.5.0. Sub Labs, Santa Clara, CA, USA, 2009
- PENTARIS, F.P., STONHAM, J. & MAKRIS, J.P. (2013), A review of the state-of-the-art of wireless SHM systems and an experimental set-up towards an improved design. Presented at the Eurocon 2013 IEEE. Zagreb, Croatia, 01.07.2013
- SMARSLY, K., LAW, K.H., KÖNIG, M. (2011), Autonomous Structural Condition Monitoring based on Dynamic Code Migration and Cooperative Information Processing in Wireless Sensor Networks. In: Chang, F.-K. (ed.). *The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring 2011*. Stanford, CA, USA, 09/13/2011. Lancaster, PA, USA: DEStech Publications, Inc., pp. 1996–2003
- VAN OVERSCHEE, P. & DE MOOR, B. (1996), *Subspace Identification for Linear Systems*. Springer US, Boston, MA, USA.
- ZIMMERMAN, A.T., SHIRAISHI, M., SWARTZ, R.A. & LYNCH, J.P. (2008), Automated Modal Parameter Estimation by Parallel Processing within Wireless Monitoring Systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 14(1), 102–113.

Earthquake Hazard Safety Assessment of Buildings via Smartphone App: An Introduction to the Prototype Features

Ehsan Harirchian¹ and Amin Harirchian²

¹Faculty of Civil Engineering · Bauhaus-Universität Weimar · Marienstraße 7 · 99423 Weimar ·
E-Mail: ehsan.harirchian@uni-weimar.de

²Faculty of Technology and Society · Malmö University · 20506 Malmö · Sweden ·
E-Mail: ab8283@mah.se

As urban areas continue to expand, there is a need for an efficient disaster management system to develop resilient communities. Moreover, the failure of man-made structures is the main cause of more injuries during an earthquake and more economical losses. The damage caused to a building can be estimated after performing the assessment of seismic vulnerability. Therefore, several seismic assessments by rapid visual screening methods (RVS) have been developed to evaluate the initial vulnerability profile of the existing building stock, which has been constructed before or after the adoption and enforcement of seismic codes. In this study, FEMA P-154, the most common RVS method (and basis of many others), has been utilized for the initial stage assessment. A global sensitivity analysis was performed to investigate the interaction between input parameters. AHP method was selected as a powerful multi-criteria decision making (MCDM) tool to evaluate and prioritize building vulnerability. The aim of this paper is to introduce an app called EHSAPP that is based on the implementation of a MCDM method to achieve an optimized earthquake hazard safety assessment. EHSAPP is used to simplify and speed up the assessment process, and to gather and process data online. In comparison to the other available software, it is more user-friendly, considers many circumstances and intelligent decision making. The prototype of this app has been tested for some damaged buildings after earthquake to ensure the accuracy, showing the efficiency of the proposed method in statistical terms comparing the proposed procedure with the standard procedure.

Keywords: Rapid visual screening; Smartphone; Seismic vulnerability; MCDM

1 Introduction

The importance of studies and research about prevention of earthquake effects have risen after destructive earthquakes, and it is necessary to assess the seismic vulnerability of buildings in urban areas as an essential parameter of earthquake disaster management policy. Moreover, majority of existing buildings in seismic regions do not satisfy modern design code requirements. Therefore, there is an urgent need for reliable vulnerability assessments, appropriate seismic risk management strategies and rapid post-disaster response to significantly reduce potential losses in future severe earthquakes. The term “seismic vulnerability” is defined as “the susceptibility of a population of buildings to undergo damage due to seismic ground motion” (SHAHRIAR et al. 2012). Most of the seismic vulnerability methods follow three level assessment procedures: Rapid Visual Screening (RVS) of buildings, preliminary assessment and detailed evaluation. RVS is the simplest one among these levels, performing basic structural calculations for quick evaluation of a large building stock

(KAPETANA & DRITSOS 2007). However, more detailed analysis would give a better assessment, but such an approach would entail unprecedented difficulties when an urban scale mitigation campaign is considered. Furthermore, determinations of earthquake safety of existing buildings require a rather long and challenging process, in terms of time, cost and expertise. In this manner, some efforts have been made to develop a tablet-based version of FEMA 154 (YANG & GOETTEL 2007), to transmit GIS visualization and mobile data for database compiling (SEXTOS et al. 2008) and other efforts e.g. ROVER v.1 (2011) and ROVER v.2 (NATIONAL 2014) or just implementation of FEMA 154 into a smartphone application with regional modification to do a quick check on the buildings in Surabaya-Indonesia (WAHYUNI et al. 2018).

The aim of this study is to develop a new RVS method via smartphone app by application of multi-criteria decision making (MCDM). For this purpose, FEMA P-154, the most common and the basis of many other RVS methods, has been utilized for the initial assessment. To have a better understanding of the interaction between parameters and to provide a decision matrix for further works, a global sensitivity analysis was performed to calculate the first order Sobol' indices via conceptual implementation method. Given the different criteria and alternatives, Analytical Hierarchy Process (AHP) is a powerful MCDM tool to implement and prioritize buildings. The many advantages of EHSAPP, such as connection to the Global Positioning System (GPS), the user-friendly design, improved assessment accuracy, storage on the online database, the ability to update any changes, consideration of different circumstances and integration into the other authority networks are all expected to simplify the mapping procedure and identifying the vulnerability of buildings because of an earthquake.

For trial validation of the proposed method, the city of Bingöl in Turkey, which is in a highly active seismic region and has experienced a severe earthquake recently, has been selected. About 7 damaged reinforced concrete buildings have been studied, the assessment via FEMA P-154 and the proposed method has been carried out, and the estimation of each has been compared to the actual damage of the same building.

2 Methodology

As was previously mentioned in this paper, a new RVS method through application of MCDM has been developed which is described in the following paragraphs.

2.1 Rapid Visual Screening

The first Rapid Visual Screening (RVS) methodology was proposed by Federal Emergency Management Agency (FEMA), U.S.A in 1988 as Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook and modified in 2002 (YADOLLAHI 2012). Since the publication of the second edition of FEMA 154, there have been many improvements in rapid visual screening of buildings, which one of these efforts was the development of the FEMA P-154 (FEMA 2015). In RVS methodology, according to the data collected during visual inspection, a structural score will be calculated without performing any structural calculations to determine the expected damage of a building and whether the building needs the next stage of assessment or not. This will save time and resources that can be respectively used for the buildings that need detailed assessment (NANDA 2014, FEMA 2015).

FEMA P-154 provided data forms for different levels of seismicity. Depending on the classification of seismicity, the relevant data form will be selected. Determine the seismicity of the site using site-specific values of seismic hazard for risk-targeted maximum considered earthquake ground motions (MCE_R) and Soil Type B as provided by the U.S. Geological Survey (USGS). The scoring factors procedure in FEMA P-154 starts with the selection of appropriate basic score (B) for buildings which will be modified by using scores of modifiers (M). The classification of damage based on final structural score (S) has been shown in Table 1. In this paper, the RC buildings have been considered and since the case study is on the high seismic area, the RVS data collection form for high seismicity has been selected.

Table 1: Structural Scores with Damage Potential (FEMA 2015).

Rapid Visual Screening score	Damage Potential
$S < 0.3$	High probability of Grade 5 damage; Very high probability of Grade 4 damage
$0.3 < S < 0.7$	High probability of Grade 4 damage; Very high probability of Grade 3 damage
$0.7 < S < 2.0$	High probability of Grade 3 damage; Very high probability of Grade 2 damage
$2.0 < S < 2.5$	High probability of Grade 2 damage; Very high probability of Grade 1 damage
$S > 2.5$	Probability of Grade 1 damage

2.2 Sensitivity analysis

The global sensitivity analysis (SA) method explore more thoroughly the relationship among inputs and outputs in the whole input space to provide more reliable measures. One type of global SA is the variance-based Sobol' method, which the significance of parameters can be expressed in terms of the first order Sobol' index (S_i) (SOBOL' 1993).

In this study the conceptual implementation method by MARZBAN & LAHMER (2016) for the estimation of S_i has been implemented. In Figure 1, the corresponding steps to calculate S_i based on conceptual implementation has been presented.

To perform sensitivity analysis, the parameters were distributed using Monte-Carlo sampling between their respective maximum and minimum values. For constant cases in conditional variance method, the mean value of each parameter was considered. Further, the influence of each parameter in FEMA P-154 was found by performing sensitivity analysis on the equations that were used in calculating final scores or performance scores in selected RVS method. The consideration of parameters, their range and mean values have been shown in the Table 2 and the final score (F_{FEMA}) was calculated by Equation 1.

$$F_{FEMA} = B + (SV + MV + PC + P_C \text{ or } P_B + S_{AB} \text{ or } S_E) \quad (1)$$

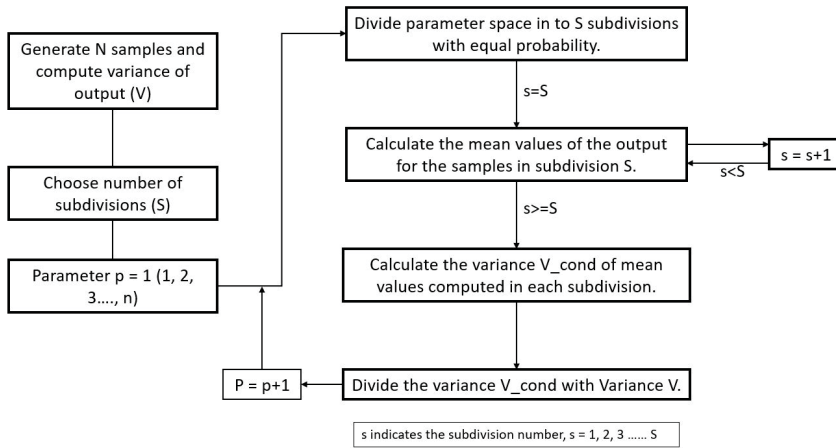


Fig. 1: Flowchart for the estimation of S_i based on conceptual implementation (MARZBAN & LAHMER 2016)

Table 2: Range and mean values of parameters used in FEMA P-154

Parameter	Range	Mean	Parameter	Range	Mean
Basic score (B)	1 to 3.6	1.9824	Pre-code (PC)	-1.1 to 0	-0.5235
Severe vertical irregularity (SV)	-1.2 to -0.7	-0.9688	Soil type A or B (S_{AB})	0.1 to 0.6	-0.62
Moderate Vertical irregularity (MV)	-0.7 to -0.4	-0.5688	Post benchmark (PB)	1.1 to 2.4	1.8071
Plan irregularity (P)	-1.1 to -0.4	-0.7375	Soil type E (S_E)	-0.9 to 0.2	-0.2903

2.3 Analytical Hierarchy Process

Analytical Hierarchy Process (AHP) introduced by SAATY (1996) is an effective tool for managing complex decisions and can help the decision maker to prioritize and make the best choice. By reducing complex decisions to a series of pairwise comparisons, and then synthesizing the consequences, the AHP aids to capture both subjective and objective aspects of a decision. The AHP can be implemented into the smartphone app by following three simple consecutive steps:

1. Computing the vector of criteria weights.
2. Pairwise comparison matrix for buildings.
3. Calculating final priority of buildings by ranking the options.

2.4 Study area

After the May 1, 2003 Bingöl earthquake in the province of the east Anatolian region of Turkey, with a magnitude of 6.4 (Mw), building damage data was collected by a team of researchers from Middle East Technical University (CHUNGWOOK et al. 2015). From that report, 7 damaged reinforced concrete buildings have been selected to study. The importance of this area is due to the Bingöl faults under high seismic zone with 10 percent probability in 50 years with PGA of 0.4g. The V_s 30 velocity of soil in Bingöl varies from 620 m/s to 760 m/s with an average Peak Ground Velocity (PGV) of 78.4 m/s.

2.5 Development of EHSAPP

The Earthquake Hazard Safety Assessment of Buildings via Smartphone App (EHSAPP) is expected to facilitate the field assessment survey. It does this by using the data gathered from a vulnerability assessment of building on the area in question, which is then sent and stored on the database server. The data contains coordinates of the building location to allow the use of building stock mapping to assess the potential hazard of the earthquake. As the alpha test of the proposed app, the buildings selected for the case study have been assessed using the app and the data produced compared with the data produced by the conventional method and actual damage. The screenshot of some pages of EHSAPP have been shown on Figure 2.

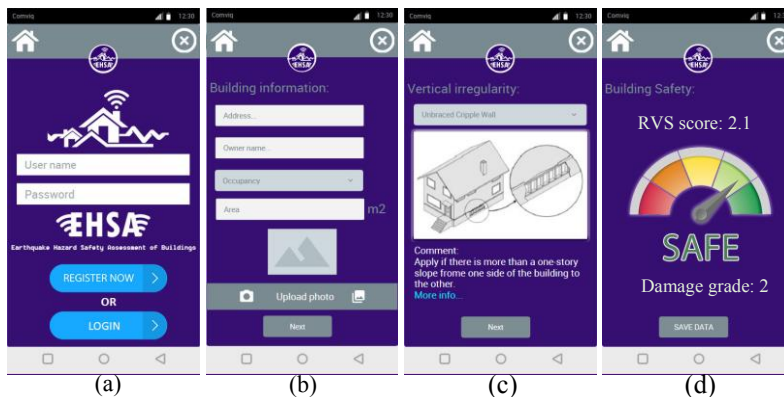


Fig. 2: Screenshot of the proposed app: (a) first page, (b) building information, (c) entering buildings irregularities, (d) building vulnerability assessment

3. Results and discussion

The main purpose of this study is to develop a new RVS method via smartphone app by application of multi-criteria decision making (MCDM). To achieve this, a sensitivity analysis on the parameters of the FEMA P-154 has been performed, the results of which are presented in Table 3.

Table 3: Sobol' indices of parameters on FEMA P-154

Parameter	Building type		Vertical irreg. S		Vertical irreg. M		Plan irreg.		Code		Soil type	
	pos	pre	pos	pre	pos	pre	pos	pre	pos	pre	pos	pre
Si	0.81	0.85	0.03	0.03	0.014	0.01	0.066	0.06	0.2	0.15	0.033	0.036
Ranking	1	1	5	5	6	6	3	3	2	2	4	4

Table 4 indicates that the basic score (B) as the main factor of building type has the highest importance and effect in between other parameters. After that as the negative parameter which effect on the buildings vulnerability is the construction year of the building and the design code at that time, built before developing seismic design code (pre-code) or after that (post-benchmark). On the third place it is plan irregularities (P) which has important effect on the buildings vulnerability. The soil type A/B and severe vertical irregularities (SV) and moderate vertical irregularities (MV) are the last effective parameters respectively.

Seismic zone plays an important role on the vulnerability of buildings on that region. Furthermore, the number of stories and appearance quality of building has a significant influence on the building. Therefore, these must be considered along with FEMA parameters. Regarding their importance ranking, the Saaty scale, which is a scale from 1 to 9 (equal to extremely importance) has been presented on Table 4. Although some parameters have last ranking, they are still effective and significant parameters. Therefore, the minimum Saaty scale for them assumed as 4. After assigning proper scale to the parameters, it is possible to provide a pairwise comparison matrix for further MCDM procedures. The decision matrix has been shown on the Table 5. The same procedure must be done to provide a pairwise comparison matrix for buildings, to do so buildings must be ranked against each other for different parameters. There were eight parameters in total, and hence 8 different matrices of size 7, as each building was ranked against each other with reference to each parameter.

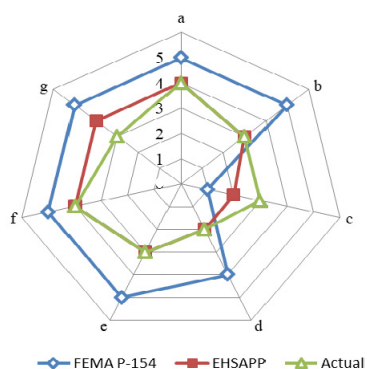
Figure 3 compares the observed damage of the case study buildings (a-g) to FEMA P-154 and EHSAPP based on EMS scale. There are some differences and similarities in the assessment and actual damage scale, which EHSAPP shows a better valuation, which 5 out of 7 buildings had the same assessment as actual damage. In contrast the majority of assessments by FEMA P-154 were overestimated, which are neither economical nor logic. In brief it can be concluded that EHSAPP has a more accurate and realistic assessment in compare to FEMA P-154.

Table 4: Ranking of considered parameters along with Saaty scale

Parameter	Seismic zone	Building type	Vertical irreg.	Plan irreg.	Code	Soil type	No. of stories	Quality
Ranking	1	1	5	3	2	4	3	6
Saaty scale	9	8	4	6	7	6	5	4

Table 5: Pairwise comparison matrix for parameters

	Seismic zone	Building type	Vertical irreg.	Plan irreg.	Code	Soil type	No. of stories	Quality
Seismic zone	1	2	6	4	3	4	5	6
Building type	0.5	1	5	3	2	3	4	5
Vertical irreg.	0.16	0.2	1	0.33	0.25	0.33	0.5	1
Plan irreg.	0.25	0.33	3	1	0.5	1	2	3
Code	0.33	0.5	4	2	1	2	3	4
Soil type	0.25	0.33	3	1	0.5	1	2	3
No. of stories	0.2	0.25	2	0.5	0.33	0.5	1	2
Quality	0.16	0.2	0.5	0.33	0.25	0.33	0.5	1

**Fig. 3:**

Damage grade comparison between actual damage, EHSAPP and FEMA P-154

4. Conclusion

The findings of this study suggest that in general the application of multi-criteria decision making and its implementation on smartphone app is providing a better seismic vulnerability assessment of buildings. They indicate that EHSAPP can be used to assess the building subjected to earthquake hazard. However, whilst the present study has only examined reinforced concrete buildings on one area, it might be developed to investigate other type and different seismicity region.

Literature

- CHUNGWOOK, S., CHENG, S., SKOK, N., IRFANOGLU, A., PUJOL, S., & SOZEN, M. (2015), Database of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings with Earthquake Damage. www.datacenterhub.org/resources/123.
- EARTHQUAKE HAZARDS REDUCTION PROGRAM, NATIONAL. (2014), FEMA ROVER Version 2, a Mobile Earthquake Safety Software New Features of ROVER Version 2. www.nehrp.gov/pdf/SeismicWavesNov2014.pdf.
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA) (2015), Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook (FEMA P-154). Federal Emergency Management Agency, no. January: 388. www.doi.org/10.4231/D3M90238V.
- KAPETANA, P. & DRITSOS, S. (2007), Seismic Assessment of Buildings by Rapid Visual Screening Procedures. In WIT Transactions on the Built Environment. www.doi.org/10.2495/ERES070391.
- MARZBAN, S. & LAHMER, T. (2016), Conceptual Implementation of the Variance-Based Sensitivity Analysis for the Calculation of the First-Order Effects. *Journal of Statistical Theory and Practice* 10 (4): 589–611. www.doi.org/10.1080/15598608.2016.1207578.
- NANDA, R. P. & DEEPTI, R. M. (2014), Rapid Seismic Vulnerability Assessment of Building Stocks for Developing Countries. *KSCE Journal of Civil Engineering* 18 (7): 2218–26. www.doi.org/10.1007/s12205-014-0050-0.
- SAATY, T. L. (1996), Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process. Vol. 4922. RWS publications Pittsburgh.
- SEXTOS, A. G., KAPPOS, A.J. & STYLIANIDIS, K.C. (2008), Computer-Aided Pre- and Post-Earthquake Assessment of Buildings Involving Database Compilation, GIS Visualization, and Mobile Data Transmission. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 23 (1): 59–73. www.doi.org/10.1111/j.1467-8667.2007.00513.x.
- SHAHRIAR, A., MODIRZADEH, M., REHAN, S. & TESFAMARIAM, S. (2012), Seismic Induced Damageability Evaluation of Steel Buildings: A Fuzzy-TOPSIS Method. *Earthquake and Structures* 3 (5): 695–717. www.doi.org/10.12989/eas.2012.3.5.695.
- SOBOL', I. M. (1993), Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models. *Mathematical Modelling and Computational Experiments* 1 (4): 407–14.
- WAHYUNI, E., IRANATA, D., SUSWANTO, B., CAHYONO, B., & WAHYUNIARSIH, S. (2018), Assessment of Vulnerable Buildings Due to Earthquake Loading Using Rapid Visual Screening Smartphone Application. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology* 8 (2): 567. www.doi.org/10.18517/ijaseit.8.2.4336.
- YADOLLAHI, M., AZLAN, A. & ROSLI, M. Z. (2012), Seismic Vulnerability Functional Method for Rapid Visual Screening of Existing Buildings. *Archives of Civil Engineering*. www.doi.org/10.2478/v.10169-012-0020-1.
- YANG, Y., AND GOETTEL, K. (2007), Enhanced Rapid Visual Screening (E-RVS) Method for Prioritization of Seismic Retrofits in Oregon. Special Paper 39. Oregon Department of Geology and Mineral Industries, Portland, 27 pp. www.oregongeology.com/sub/pub&data/EQPBLST5.HTM.

Comparative study of experimentally tested tuned liquid column dampers

Saboor Karimi, Behnam Mehrkian Jorshari, Elnaz Mousazadeh,

Maria Steiner and Kosmas Dragos

Computing in Civil Engineering · Bauhaus University Weimar · Coudraystraße 7 · 99423 Weimar
Germany · Email: saboor.karimi@uni-weimar.de

In recent decades, studies on tuned liquid column damper (TLCD) performance are limited to numerical simulations, while comparative experimental studies in this direction are scarce. In this paper, a comparative experimental study on optimized TLCDs is presented. Specifically, using nonlinear constrained optimization, geometric layouts of TLCDs are designed for a four-story shear-frame structure, geometry being an influential element on TLCD dynamic behavior. The structural behavior is monitored using a wireless structural health monitoring system designed to measure and process acceleration responses. Results indicate that the TLCDs are tuned effectively since additional damping can be supplemented to the structure. In addition, it is observed that theoretically optimized TLCDs do not necessarily perform as anticipated, as a result from the interference of other physical governing factors.

Keywords: Tuned liquid column damper, structural control, structural health monitoring

1 Introduction

Developments in civil engineering technologies have resulted in significant performance enhancement of structures. Nowadays, an increasing number of structures are assumed to be intelligent, i.e. able to monitor the structural condition through structural health monitoring (SHM) systems as well as to minimize the effect of extreme loadings, by means of control devices (KO & NI 2003). SHM is a promising strategy for assessing the condition of structural systems and for estimating structural properties in an attempt to avert hazards posed to public safety as a result of structural degradation. Structural properties usually encompass structural dynamic parameters, such as natural frequencies, mode shapes, and damping ratios (WHELAN et al. 2009). Typical SHM systems comprises sensor networks, a data transfer unit and data interpretation systems, which measure structural response data, establish connections for transferring the data and analyze the data, respectively. SHM systems can be implemented with wireless or cable-based sensor networks. Wireless sensor networks (WSNs) are characterized by limitations with respect to power supply and to transmission reliability. However, due to the significant cost reduction in applying WSNs, a number of research attempts have been done to address the drawbacks of WSNs (DRAGOS & SMARSLY 2015). SHM systems are frequently complemented with subsystems designed to modify the structural behavior, termed “structural control systems”.

Structural control, which has been first introduced in the work of YAO (1972), has emerged as a modern and more effective alternative to conventional methods for minimizing the effect of dynamic loads. Generally speaking, structural control can be classified into three fields: passive (SOONG & DARGUSH 1997), semi-active (HROVAT et al. 1983), and active (SOONG 1990). Both semi-active and active systems require control algorithms, which may be

sophisticated in real applications. In contrast, passive control systems are fail-safe systems that, despite their simplicity, could result in effective structural control. A special class of structural control systems, the “tuned liquid column dampers” (TLCDs) have attracted increasing attention. TLCDs, which have been introduced by FRAHM (1910), have emerged for the first time in civil engineering applications by SAKAI et al. (1991). ALTAY et al. (2014) have studied the towers of wind turbines under non-uniform steady-state turbulent wind flow using a U-shaped tank filled with a Newtonian liquid, which has added damping through oscillation of the liquid mass with respect to the structure. As a result, the TLCD has proven to be effective in reducing resonant vibrations of the tower and in improving fatigue life. Similar conclusions have also been reported by COLWELL & BASU (2009).

This paper presents a comparative study between different optimized TLCDs. Specifically, a series of TLCDs with different geometries are designed using an optimization approach and developed in the laboratory. Then, the TLCDs are mounted on a four-story shear-frame structure, and laboratory tests are conducted. During the tests, structural response data is recorded by a wireless SHM system, which is then used for comparing uncontrolled and controlled responses of the structure for each TLCD. In the second section of this paper, the design of the TLCDs is presented. Next, the experimental setup and the laboratory tests are described, followed by a discussion on the test results. The paper ends with a summary and conclusions as well as with an outlook on future research.

2 Design of tuned liquid column dampers

This section presents the design of the three tuned liquid column dampers used in this study. First, the mathematical background on TLCD operation is illuminated and, next, the TLCD optimal design process is described.

2.1 Mathematical background of tuned liquid column dampers

A TLCD consists of a U-shaped tank filled with a Newtonian liquid that oscillates out-of-phase with the structure on which the TLCD is mounted, as shown in Figure 1. As a result, the energy transferred from the structure to the TLCD is dissipated via the hydrodynamic head losses (LINSHEG et al. 2013). According to the nonlinear Bernoulli equation (ALTAY et al. 2014), the dynamics of the liquid in a TLCD are described as follows:

$$\ddot{u} + \delta |\dot{u}| \dot{u} + \omega_D^2 u = -\gamma_1 (\ddot{x} + \ddot{x}_g) \quad (1)$$

$$\omega_D = \sqrt{\frac{2g}{L_1} \sin \alpha} \quad \gamma_1 = \frac{H + 2V \cos \alpha}{L_1} \quad L_1 = 2V + \frac{A_v}{A_H} H$$

In Equation (1), u is the stream of the liquid column, $\ddot{x} + \ddot{x}_g$ is the absolute acceleration of the structure under both dynamic forces and base excitation, and δ denotes pressure loss as a result of turbulence and friction effects. Parameter ω_D represents the natural frequency of the TLCD depending on the gravitational acceleration g , the inclination angle α , and the effective length L_1 , which amplifies the liquid length by the ratio of the cross-sectional areas of the vertical segments A_v and of the horizontal segment A_H , respectively. Finally, γ_1 is a geometric factor determined by the geometry of the TLCD that scales the interaction force between the

TLCD and the structure. The equation of motion of a single-degree-of-freedom (SDOF) structure equipped with a TLCD is as follows:

$$\ddot{x} + D_H \omega_H \dot{x} + \omega_H^2 x = -\ddot{x}_g + f(t) - \mu(\ddot{x} + \ddot{x}_g + \gamma_2 \dot{x})$$

$$\gamma_2 = \frac{H + 2V \cos \alpha}{L_2} \quad L_2 = 2V + \frac{A_H}{A_V} H \quad (2)$$

In Equation (2), $\mu(\ddot{x} + \ddot{x}_g + \gamma_2 \dot{x})$ is the damping force created by the motion of the liquid mass. Parameters D_H and ω_H are the total damping ratio (inherent to the structure plus the added damping from the TLCD) and the fundamental angular frequency of the structure, respectively, μ is the mass ratio of the liquid mass over the modal mass of the structure at the fundamental vibration mode, \ddot{x}_g is the ground motion, $f(t)$ is the excitation force, and γ_2 is the second geometric factor of TLCD.

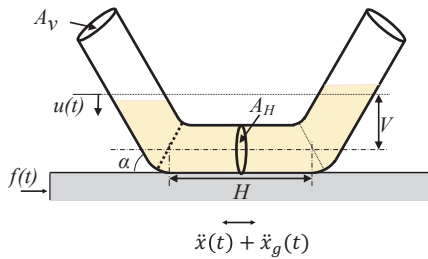


Fig. 1:
Schematic of a typical TLCD excited horizontally

2.2 Optimized design of tuned liquid column dampers

To design a TLCD, it is necessary to know the effect of the variables in Equations (1) and (2) on the dynamic behavior of the TLCD. For example, an increase in μ enhances the efficiency of the TLCD, and higher γ_1 and γ_2 parameters result in larger damping. However, increasing γ_1 also results in an increase of the interaction force between the TLCD and the structure, potentially causing sloping over the liquid. Thus, it is recommended to enhance damping effects by increasing γ_2 . Other governing parameters are the optimal frequency $f_{D,opt}$, the optimal damping $D_{D,opt}$, and the active mass ratio μ^* , which are defined as follows:

$$f_{D,opt} = f_H \frac{\sqrt{1 - \mu^*/2}}{1 + \mu^*} \quad D_{D,opt} = \sqrt{\frac{\mu^* \left(1 - \mu^*/4\right)}{4(1 + \mu^*) \left(1 - \mu^*/2\right)}} \quad \mu^* = \frac{\mu \gamma_1 \gamma_2}{1 + \mu(1 - \gamma_1 \gamma_2)} \quad (3)$$

Parameters $f_{D,opt}$, $D_{D,opt}$ and μ^* are obtained based on tuning criteria proposed by DEN HARTOG (1947) for tuned mass dampers, by substituting u with $u^* = u/\gamma_1$ in Equation (1) according to the specification proposed by WARBURTON & AYORINDE (1980) for stochastic excitations, such as earthquakes. The next step is to determine the target natural frequency and modal mass of the four-story shear frame structure to which the TLCDs are tuned. As shown in Figure 2, the structure is simulated as a lumped-mass model, which is used for performing modal analysis using a finite element software (CLOUGH & PENZIEN 1993).

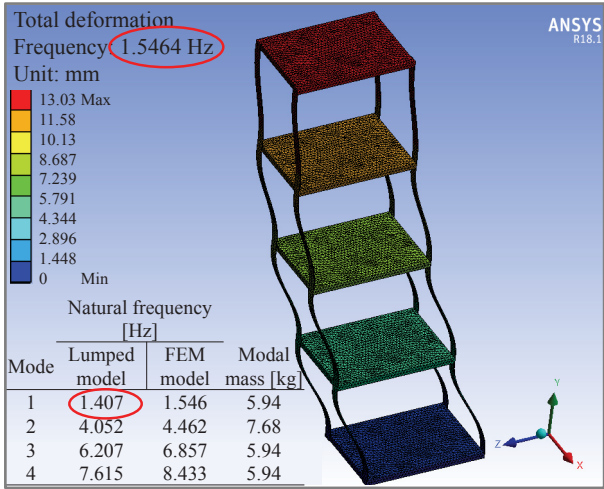


Fig. 2:
Modal analysis of the four-story shear frame structure

For optimizing the TLCD layout, a nonlinear constrained optimization problem is formulated by using the generalized reduced gradient (GRG) method and by cross-validating the results via the Trust-Region-Method proposed by XUE & CHEN (2008). In the optimization, the geometric variables V , H , A_v , A_H and α , introduced in Figure 1 are considered. To constrain these variables, physical dimensions of the structure and commercial availability of components are taken into account. According to the aforementioned argument on TLCD efficiency, the objective function adopted for the optimization is $J = \gamma_1 \gamma_2$. To consider the influence of the variation of angle α , three angles of 45°, 60°, and 90° are chosen, each corresponding to one of the three TLCDs designed in this study. Furthermore, for purposes of convenience in the manufacturing process, cross section dimensions A_v and A_H are selected close to each other. For TLCD mass calculation, the liquid considered is water. To ensure the TLCD efficiency, maximum tolerable discrepancies between the theoretical values for optimal frequencies and active mass ratios calculated from Equation (3) for each TLCD and the corresponding actual values (Δf_{max} and $\Delta \mu^*_{max}$) are limited to 1% and 0.1%, respectively. The theoretical active mass ratio is set for all cases equal to $\mu^* = 0.073$. The optimal parameters of the three TLCDs are presented in Table 1.

Table 1: Results of the optimization on three TLCDs

TLCD type	V [cm]	H [cm]	A_v [cm ²]	A_H [cm ²]	α [°]	m_D [kg]	f_D [Hz]	$D_{D,opt}$	Δf_{max}	$\Delta \mu^*_{max}$	J
TLCD-45	3.6	15.16	25.05	25.90	45	0.575	1.268	0.135	0.010	0.059	0.820
TLCD-60	3.7	18.93	25.50	25.50	60	0.671	1.279	0.138	0.002	0.100	0.739
TLCD-90	4.0	22.83	27.36	27.63	90	0.851	1.274	0.132	0.010	0.001	0.548

3 Experimental tests

In this section, the experimental tests conducted for performing the comparative study between the three TLCDs are presented. First, the experimental setup is described, next, the tests are shown, and, finally, the test results are discussed.

3.1 Experimental setup

The four-story shear-frame structure consists of aluminum plates of dimensions $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ (length \times width \times thickness) resting on four $20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ aluminum columns. The plate-to-column connections are fully fixed, and the four columns are clamped to a base plate, which is fixed to a solid block ensuring full fixity at the column base. The story height is 300 mm . According to the optimization results, tubes of 63 mm outside diameter are employed. The tube thickness is selected equal to 1.8 mm for the TLCD_{90°} and 3 mm for the rest of the TLCDs. To control the flow of water, valves with 63 mm internal diameter are installed at the middle of the horizontal parts of the tubes. The layouts of the three TLCDs are illustrated in Figure 3.

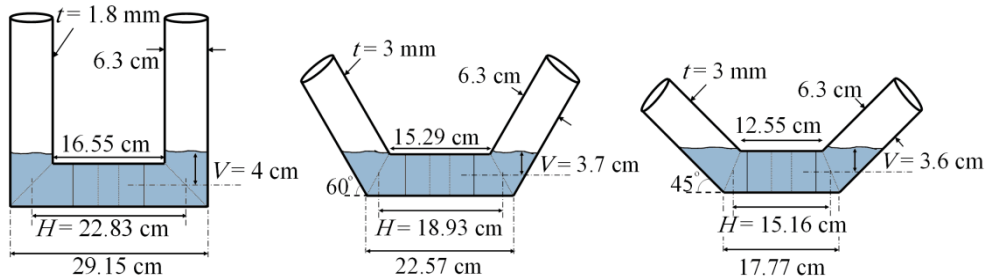


Fig. 3: Specifications of the designed TLCDs

For collecting SHM response data, Oracle SunSPOT wireless sensor nodes are used (ORACLE 2010). The sensor nodes include a Java programmable 400 MHz ARM microprocessor, 1 MB RAM for data storage and 4 MB flash memory. Sensor nodes are equipped with digital accelerometers measuring at sampling rates up to 250 Hz and at measurement ranges of $\pm 2g$, $\pm 6g$, or $\pm 8g$. The analog-to-digital conversion rate is 8 bit . As shown in Figure 4, one sensor node is placed at the center of each story.

To excite the structure, an initial deflection of 5 cm is applied at the top story, after which the structure vibrates freely. The TLCDs are tuned to the fundamental frequency of the structure, and the sampling rate for collecting acceleration response data is set equal to 125 Hz .

3.2 Results and discussion

To demonstrate the effect of the TLCDs on the structural behavior, the acceleration responses at the 4th story are shown for both uncontrolled and controlled states (i.e. without TLCDs and with TLCDs). The uncontrolled state is achieved by keeping the valve closed, while the controlled state corresponds to an open valve. The TLCDs are installed on the 4th story for all tests.

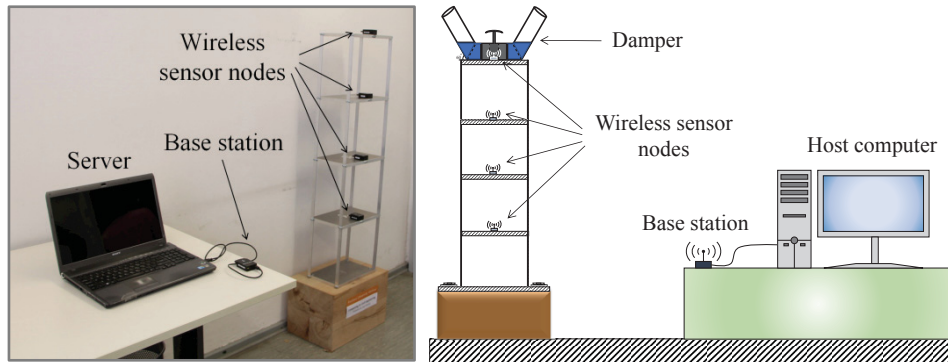


Fig. 4: Experimental setup

In the uncontrolled state, acceleration responses exhibit no notable reduction for the first 16 seconds of oscillation, as shown in Figure 5, thus indicating low damping. By contrast, a significant effect of damping can be seen in the responses of the controlled state shortly after initiating the excitation. The uncontrolled and controlled acceleration responses of the 4th story and the corresponding spectral amplitudes are presented for all TLCDs in Figure 5. According to the expected efficiency of each TLCD shown in Table 1, the TLCD_{45°} should show the highest damping effect and the TLCD_{90°} the lowest. However, the results of the tests displayed in Figure 5 show that the TLCD_{90°} actually performs best and the TLCD_{45°} demonstrates the worst performance. The disagreement between theoretical analysis and experimental results with respect to the TLCD performance can be attributed to two parameters: the mass of the liquid and the intrinsic damping in each device. In the optimization, the criterion kept constant for all three TLCDs is the active mass ratio of the liquid μ^* , which does not necessarily result in the same liquid mass m_D for each damper (see Table 1). In addition, each device produces different intrinsic damping based on its specifications. Inherently, in the 90° TLCD, friction effects at the corners are stronger than in other TLCDs; for improving the damping effects further tests are required, which fall beyond the scope of this paper.

In the frequency domain, it is observed in Figure 5 (bottom left) that all dampers are well-tuned to the fundamental natural frequency of the structure (around 1.59 Hz), since the spectral amplitudes are diminished at this frequency. At higher frequencies the peak suppression effect is smaller. Figure 5 (bottom right) also illustrates the better performance of TLCD_{90°} compared to the rest of the TLCDs, characterized by the splitting of the peak at the fundamental frequency of the bare frame into two adjacent frequencies following the fundamental principles of optimal tuned mass damper operation (CONNOR 2002). While for the other two dampers, the peak suppression effect is visible, calibrations regarding the optimum damping are necessary to achieve the peak splitting.

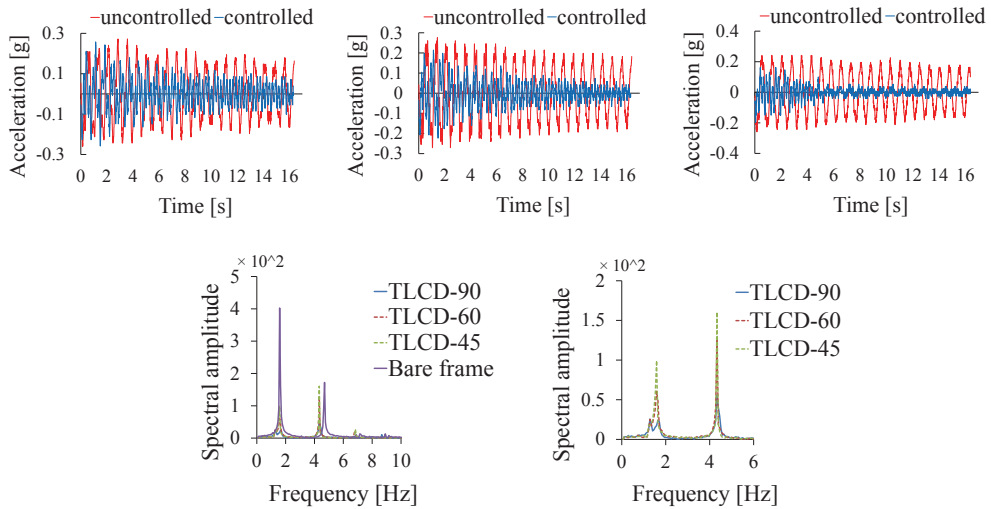


Fig. 5: Uncontrolled and controlled acceleration responses of the 4th story when TLCD45° (top left), TLCD60° (top middle) and TLCD90° (top right) are mounted, and the respective spectral amplitudes (bottom left). Comparison between spectral amplitudes of the three TLCDs (bottom right).

4 Summary and conclusions

This paper has presented a comparative study to investigate the performance of different TLCDs on a four-story shear-frame structure. Three TLCDs with column inclinations of 45°, 60°, and 90°, respectively, have been designed using the GRG optimization approach. The TLCDs have been tested in the laboratory and structural response data has been recorded by wireless sensor nodes. The results have shown that all TLCDs have been well-tuned to the fundamental frequency of the structure, since the TLCDs have been able to significantly dampen the excitation energy. Moreover, comparisons between the expected results from the numerical analysis of the TLCDs and the experimental results have indicated that theoretically optimized TLCD performance might not be in accordance with experimental TLCD performance. Specifically, although the TLCD_{90°} has been expected to possess the lowest efficiency, this TLCD has shown the best performance, the disagreements being potentially attributed to differences in the intrinsic damping of the TLCDs or to the mass of the liquid employed. These disagreements reveal that a mere optimization cannot ensure efficient TLCD performance, rendering further investigation necessary for achieving experimentally optimized TLCDs.

Literature

- ALTAY, O., BUTENWEG, C., KLINKEL, S. & TADDEI, F. (2014), Vibration Mitigation of Wind Turbine Towers by Tuned Liquid Column Dampers. In: Proceedings of the International Conference on Structural Dynamics, 9. Porto.
- CLOUGH, R. W. & PENZIEN, J. (1993), Dynamics of structures: 2nd edition. New York City, NY, USA, McGraw-Hill.
- COLWELL, S. & BASU, B. (2009), Tuned liquid Column Dampers in Offshore Wind Turbines for Structural Control. In: Engineering Structures, 31 (2), 358-368.
- CONNOR, J. J. (2002), Introduction to Structural Motion Control. Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall Inc.
- DEN HARTOG, J. P. (1947), Mechanical vibrations. NY, USA, McGraw-Hill.
- DRAGOS, K. & SMARSLY, K. (2015), A Comparative Review of Wireless Sensor nodes for Structural Health Monitoring. In: Proceedings of the International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII), 7. Turin.
- FRAHM, H. (1910), Means for Damping the Rolling Motion of Ships. US-Patent 970, 368, Alexandria, VA, USA, United States Patent and Trademark Office.
- HROVAT, D., BARAK, P. & RABINS, M. (1983), Semi-active Versus Passive or Active Tuned Mass Dampers for Structural Control. In: Journal of Engineering Mechanics, 109 (3), 691-705.
- JONKMAN, J., BUTTERFIELD, S., MUSIAL, W. & SCOTT, G. (2009), Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. Technical Report NREL/TP-500-38060, Golden, Colorado, USA, National Renewable Energy Laboratory.
- KO, J. M. & NI, Y. Q. (2003), Structural Health Monitoring and Intelligent Vibration Control of Cable-supported Bridges: Research and application. In: KSCE Journal of Civil Engineering, 7 (6), 701-716.
- LINSHENG, H., WENHE, S., HONGNAN, L., & YAOWEN, Z. (2013), Optimal Design of Liquid Dampers for Structural Vibration Control Based on GA and H_∞ Norm. In: Mathematical Problems in Engineering, 2013 (5), Article ID 191279.
- ORACLE CORP. (2010), Sun SPOT eDEMO Technical Datasheet, 8th edition. Santa Clara, CA, USA, Sun Labs.
- SAKAI, F., TAKAEDA, S. & TAMAKI, T. (1991), Damping device for tower-like structure. US Patent 5,070,663, Alexandria, VA, USA, United States Patent and Trademark Office.
- SOONG, T. T. (1990), Active Structural Control: theory and practice. Harlow, England, Longman Wiley.
- SOONG, T. T. & DARGUSH, G. F. (1997), Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering. NY, USA, John Wiley & Sons, Inc.
- WARBURTON, G. B. & AYORINDE, E. O. (1980), Optimum Absorber Parameters for Simple Systems. In: Earthquake Engineering Structural Dynamics, 8 (3), 197-217.
- WHELAN, M. J., GANGONE, M. V., JANOYAN, K. D. & JHA, R. (2009), Real-time Wireless Vibration Monitoring for Operational Modal Analysis of an Integral Abutment Highway Bridge. In: Engineering Structures, 31 (10), 2224-2235.
- XUE, D. & CHEN, Y. (2008), Solving Applied Mathematical Problems with Matlab. Boca Raton, FL, USA, Chapman and Hall.
- YAO, J. T. P. (1972), Concept of Structural Control. In: ASCE Journal of Structural Division, 98 (7), 1567-1574.

Session 7:

Visualisierung 1

Maschinelles Sehen für die automatische Erkennung von Baubehelfen

Katrin Jahr und Alex Braun

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation ·
Technische Universität München · Arcisstr. 21 · 80333 München
E-Mail: katrin.jahr@tum.de, alex.braun@tum.de

Fernerkundungsdaten sind aufgrund ihrer Flächendeckung, ihrer hohen räumlichen Auflösung und ihrer exakten zeitlichen Zuordnung wichtige Basisdaten für Kartierung und Modellierung im Rahmen von GIS-Anwendungen. Zukünftige Satellitensysteme mit größerer räumlicher, vor allem aber auch spektraler Auflösung (Stichwort: *imaging spectroscopy*) führen zu einem ständig wachsenden Datenvolumen und lassen sich damit nur noch eingeschränkt in Geoinformationssystemen bearbeiten. Gerade im Hinblick auf die schnelle Übertragung von Fernerkundungsdaten oder von digitalen Karten, die mit Fernerkundungsdaten hinterlegt sind, wird der Einsatz von Kompressionsmethoden in naher Zukunft unumgänglich sein.

Keywords: Bildverarbeitung, BIM, UAV, Computer Vision

1 Einleitung

Die fortschreitende Digitalisierung der Bauindustrie bietet vielfältige Möglichkeiten für den Entwurf, die Planung und die Überwachung von Gebäuden. Dabei konzentrierten sich viele Forschungsprojekte auf Methoden des computergestützten Ingenieurbaus und den Planungsprozess. Nach dem Abschluss der Planungsphase wird digitale Unterstützung kaum in Anspruch genommen. Besonders die arbeitsintensive Baufortschrittsüberwachung wird in der Regel mit wenig technischer Unterstützung händisch vor Ort durchgeführt.

Die Bildverarbeitung bietet großes Potential für die Bauüberwachung. In den letzten Jahren wurden verschiedene Bilderfassungsgeräte, wie Drohnen und Laserscanner, auf ihre Eignung in der Bauindustrie untersucht. Mit den resultierenden 3D-Punktwolken und Informationen aus dem zugehörigen BIM-Model kann ein detaillierten Vergleich von Planung („as-planned“) und Ausführung („as-built“) erstellt und der aktuelle Baufortschritt verfolgt werden (GOLPARVAR-FARD, PENA-MORA, AND SAVARESE 2009; BRAUN et al. 2015).

Zur Erzeugung hochwertiger Punktwolken wird eine große Anzahl überlappender Fotografien benötigt. Dies bedeutet einen großen Aufwand sowohl bei der Bilderfassung, als auch bei der Bildverarbeitung. Viele Überwachungsaufgaben, beispielsweise die Überwachung der Baustelleneinrichtung und der Materialvorhaltung, erfordern jedoch keine detaillierten 3D-Informationen. Für diese Anwendungsfälle bietet die Analyse und Objekterkennung einzelner Fotografien eine günstige Alternative, da die Aufnahme einzelner Bilder einen wesentlich geringeren Aufwand darstellt als die Erstellung einer 3D-Punktwolke.

In diesem Paper wird am Beispiel von Schalungselementen ein Ansatz der künstlichen Intelligenz demonstriert, mit dem Bauelemente und Bauhilfsmittel vor Ort erkannt und lokalisiert werden können. Dazu werden zwei verschiedene neuronale Netze verwendet, mit deren Hilfe

Fotografien von Baustellen analysiert werden. Der erste Teil des Beitrages gibt einen Überblick über den aktuellen Stand im Bereich der Bildanalyse, gefolgt von einer Beschreibung der verwendeten Methoden. Anschließend wird eine Fallstudie präsentieren und der Beitrag einer Zusammenfassung unserer Ergebnisse abgeschlossen.

2 Stand der Technik

Das maschinelle Sehen erhielt durch die jüngsten Fortschritte im Bereich des autonomen Fahrens und maschinellen Lernens verstärkte Aufmerksamkeit. Die Anwendung von Techniken der Bildanalyse auf Fotografien von Baustellen ist dagegen ein eher neues Thema. Da einer der Schlüsselaspekte des maschinellen Lernens die Sammlung großer Datensätze ist, konzentrieren sich aktuelle Ansätze vorrangig auf die Datenerfassung. HAN UND GOLPARVAR-FARD (2017) nutzen Amazon Turk zur händischen Generierung von Labels für Bilder. KROPP, KOCH, UND KÖNIG (2018) versuchen, am Beispiel von Heizkörpern, Innenausbauteile über deren Ähnlichkeiten zu erkennen.

Für die effektive und effiziente Bildanalyse und Objekterkennung wurden in den letzten Jahrzehnten vermehrt maschinelle Lernalgorithmen eingesetzt. 2012 erreichte das Convolutional Neural Network (CNN) „AlexNet“ (KRIZHEVSKY, SUTSKEVER, AND HINTON 2017) einen Top-5-Fehler von 15,3% im renommierten Wettbewerb von ImageNet („Large Scale Visual Recognition Challenge“) (RUSSAKOVSKY et al. 2015). Diese Fehlerrate galt zum damaligen Zeitpunkt als überraschend gering und zeigt die Überlegenheit von CNN gegenüber anderen Methoden (LECUN, BENGIO, AND HINTON 2015).

Es gibt verschiedene Aufgaben, die durch Bildverarbeitungsalgorithmen gelöst werden können. Zu den bekannten Problemen gehören die Klassifizierung, bei der Bilder eines Objektes einer bestimmten Klasse zugeordnet werden, die Objekterkennung, bei der mehrere Objekte innerhalb eines Bildes klassifiziert und lokalisiert werden, und die Bildsegmentierung, bei der jedes Pixel eines Bildes klassifiziert wird (BUDUMA 2017). In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf die Klassifizierung und die Objekterkennung.

CNNs sind in Schichten strukturiert. Jede Schicht umfasst mehrere Berechnungseinheiten (Neuronen), welche mit benachbarten Neuronen in den vorangehenden und nachfolgenden Schichten verbunden sind. Die Verbindungen werden während eines Trainingsvorganges gewichtet, wobei die Gewichte innerhalb eines Layers geteilt werden. Die Neuronen der ersten Schicht (input layer) repräsentieren die Pixel des analysierten Bildes, die letzte Schicht (output layer) repräsentiert die möglichen Vorhersagen des Netzes. Zwischen Eingabe- und Ausgabeschicht wird eine beliebige Anzahl von verborgenen Ebenen angeordnet (Abbildung 1).

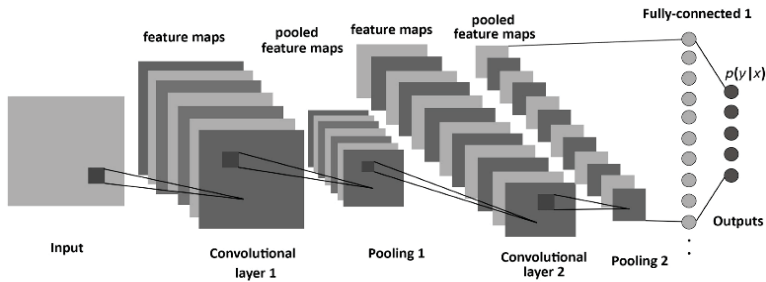


Abb. 1: Beispiel für ein CNN mit convolutional, pooling und fully conncted layers.

Während AlexNet 8 versteckte Schichten enthält, verwenden GoogLeNet (SZEGEDY et al. 2015) 22 und Microsoft ResNet (HE et al. 2016) mehr als 100 versteckte Schichten. Die Schichten sind in der Regel convolutional layer (Faltung; einzelne Merkmale werden geschärft), pooling layer (überflüssige Informationen werden verworfen) oder fully connected layers (vollständig verbundene Schichten; ermöglichen Klassifizierung) (BUDUMA 2017; ALBELWI AND MAHMOOD 2017).

CNNs können durch Training an verschiedene Probleme, beispielsweise die Erkennung von Schalungselementen, angepasst werden. Während des Trainings wird das Netzwerk mit Bildern gefüttert und die Ergebnisse mit den korrekten Lösungen („ground truth“) verglichen. Anschließend wird die Verbindungstärke zwischen bestimmten Neuronen aufeinanderfolgender Schichten erhöht oder reduziert. Üblicherweise wird das Training über einen Back-propagation Algorithmus durchgeführt (BUDUMA 2017).

Um ein CNN zu trainieren, werden viele Bilder benötigt, die in einem Preprocessing-Schritt vorbereitet werden müssen. Um das Training beschleunigen, können Gewichte von zuvor trainierten CNNs wiederverwendet werden. Diese können auf einer großen Datenbasis vortrainiert werden – ImageNet stellt etwa 1.000 Bilder pro Klasse zur Verfügung (RUSSAKOVSKY et al. 2015). Zur Anpassung auf das neue Problem müssen die letzten Schichten des CNN ersetzt werden, und anschließend die Gewichte mit den neuen Daten trainiert werden.

3 Methodik

Dieser Beitrag fokussiert auf die bildbasierte Erkennung von temporären Konstruktionselementen, insbesondere Schalungen. Die Erkennung wiederkehrender, ähnlicher Objekte kann durch maschinelles Lernen gelöst werden. Dabei werden hier die Bildklassifizierung und die Objekterkennung untersucht.

3.1 Bildklassifizierung mit CNNs

Bei der Klassifizierung, die auch als Bilderkennung bezeichnet wird, werden Bilder klassifiziert, die genau ein Objekt enthalten. Jede Klasse, die das CNN erkennen kann, wird durch ein Ausgabe-Neuron repräsentiert. Die Aktivität der Ausgabe-Neuronen wird als die Wahrscheinlichkeit gelesen, dass das Bild ein Objekt der entsprechenden Klasse enthält.

Klassifizierungsalgorithmen können nicht zur Analyse von Bildern mit mehreren Objekten verwendet werden. Da Bilder von Baustellen mehr als ein Objekt enthalten, können Bildklassifizierungsalgorithmen nur nach der Vorverarbeitung der Daten angewendet werden. Sie können jedoch sehr nützlich sein, um gezielte Fragestellungen zu beantworten, z.B. ob eine Wand an einer bestimmten Position fehlt, derzeit eingeschalt oder bereits fertig gestellt ist.

3.2 Objekterkennung mit CNNs

Die naheliegende Lösung zum Analysieren von Bildern mit mehreren Objekten besteht darin, eine sliding Window Funktion auf das Bild anzuwenden und auf jedem Fenster eine Bildklassifizierung durchzuführen. Diese Methode ist rechnerisch sehr aufwändig. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wurden verschiedene Vorschläge gemacht, z.B. region-proposal networks (z. B. R-CNN (GIRSHICK 2015), (REN et al. 2017)), die interessante Bereiche innerhalb eines Bildes erkennen und nur diese weiter analysieren, sowie single shot detectors, (zB DetectNet (TAO, BARKER, AND SARATHY 2016) und YOLO (REDMON ET AL. 2016; REDMON AND FARHADI 2017; REDMON AND FARHADI 2018)), die das Bild mit einem Gitter überlagern und jede Zelle analysieren.

3.3 Evaluation von CNNs

Um die Leistung eines Klassifizierungsalgorithmus zu messen, werden der Top-1-Error und der Top-5-Error verwendet. Der Top-1- Error repräsentiert den Anteil der Bilder, für den die korrekte Klasse mit der höchsten Wahrscheinlichkeit vorhergesagt wurde. Der Top-5- Error ist der Anteil von Bildern, für den die korrekte Klasse innerhalb der 5 Klassen liegt, die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit vorhergesagt wurden.

Um die Leistung eines Objekterkennungsalgorithmus zu messen, können die Genauigkeit (precision) p , der Ausfall (recall) r und die durchschnittliche mittlere Genauigkeit (mean average precision) mAP verwendet werden. r und p werden unter Verwendung der Anzahl von richtig positiven Treffern TP, falschen positiven Treffern FP und falsch negativen Treffern FN berechnet: $p = \frac{TP}{TP+FP}$, $r = \frac{TP}{TP+FN}$

Bei Objekterkennungsaufgaben wird eine Vorhersage als richtig positiv gewertet, wenn sich ground truth und Vorhersage weit überlappen. Als Maß wird die „intersection of union (IoU)“ verwendet, das Verhältnis aus Schnittmenge und Vereinigung der Begrenzungsrechtecke von ground truth und Vorhersage (vgl. Abbildung 2). Üblicherweise zählt eine Vorhersage als richtig positiv, wenn der IoU mehr als 0,5 beträgt. Zusätzlich wird der mAP herangezogen, der über alle Klassen gemittelte Durchschnitt der Genauigkeit in Abhängigkeit des Ausfallwerts (RUSSAKOVSKY et al. 2015).

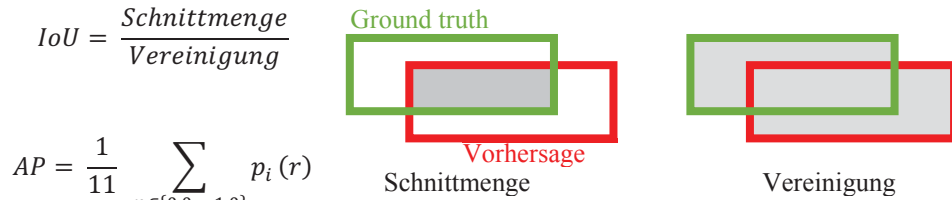


Abb. 2: Schnittmenge und Vereinigungsmenge für vorhergesagte und tatsächliche Begrenzungsrechtecke

3.4 Labeling

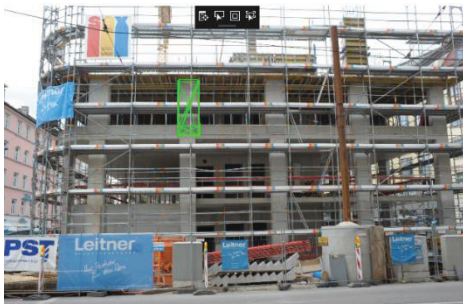


Abb. 3: Reprojiziertes Begrenzungsrechteck einer Stütze

Das Erstellen der ground truth wird als Labeling bezeichnet. Dabei werden alle Objekte in einem Set von Bildern gekennzeichnet. Da viele Bilder benötigt werden, stellt das händische Labeln einen großen zeitlichen Aufwand dar. BRAUN et al. 2018 schlagen einen neuen Ansatz zur automatisierten Markierung vor. Im Rahmen des Forschungsprojekts ProgressTrack mit dem Fokus auf automatisierter Fortschrittsüberwachung mit photogrammetrischen Punktwolken wurde ein Algorithmus zur Validierung von Erkennungsergebnissen des Ist-Vergleichs im Vergleich zum geplanten Vergleich entwickelt. Wie in Abbildung 3 dargestellt, kann die projizierte 2D-Geometrie

von Konstruktionselementen aus dem Gebäudedatenmodell-Koordinatensystem in das 2D-Koordinatensystem des Bildes umgewandelt werden, in dem das Element enthalten ist. Dies ist möglich, da die Bilder während des photogrammetrischen Prozesses ausgerichtet und orientiert wurden und somit die genaue Position jedes Bildes in Bezug auf das BIM Model bekannt ist. Von dieser Arbeit kann der Prozess des Labelns profitieren, da alle Gebäudeelemente auf allen vorhandenen Bildern markiert werden können. Die Forschung hierzu dauert an.

4 Fallstudie

In den folgenden Abschnitten wird eine Routine zur Bildanalyse mit Datenaufbereitung und Training von CNNs vorgestellt, um Schalungselemente erkennen zu können.

4.1 Vorbereitung der Daten

Als erster Datensatz wurden 9.956 Schalungselemente auf Bildern von drei Baustellen in Deutschland manuell gelabelt. Die Bilder enthalten Schalungselemente von zwei Herstellern und variieren in Größe (30cm bis 2,70m Länge) sowie Farbe (rot, gelb, schwarz, grau). Sie wurden bei wechselnden Wetterverhältnissen aufgenommen. Die Bildaufnahme erfolgte mit aus der Luft mit verschiedenen UAVs und vom Boden mit Handkameras. Die Auflö-

variiert von 4000x3000 px bis 6000x4000 px. Das manuelle Labeln dieses Datensatzes dauerte rund 130 Stunden (für Beispielbilder siehe Abbildung 4a). Die Labels werden als Textdateien gespeichert und entsprechend der Anforderungen der neuronalen Netze verarbeitet.

a) Labeled images



b) Image patches for classification



c) Prepared snippets for DetectNet



Abb. 4: Beispielbilder zur Klassifizierung und Erkennung

4.2 Bildanalyse

Für die Bildanalyse wird das Nvidia Deep Learning-GPU-Trainingssystem DIGITS (YEAGER 2015) verwendet, das eine grafische Webschnittstelle zu den weit verbreiteten Machine-Learning-Frameworks Tensor-Flow, Caffe und Torch bietet (NVIDIA 2018). Es ermöglicht die Verwaltung der Daten, das Erstellen von CNNs und die Visualisierung des Trainingsprozesses.

4.2.1 Bildklassifizierung

Für die Klassifizierung wird ein in Caffe implementiertes GoogLeNet und der Adam Solver (KINGMA UND BA 2014) verwendet. Zur Erstellung von Bildern, welche genau ein Schalelement enthalten, wurden die Baustellenfotos automatisiert entlang der Begrenzungsrechtecke beschnitten (siehe Abbildung 4b). Das Tool zur Beschneidung der Bilder wird auf GitHub als OpenSource-Lösung zur Verfügung gestellt¹. Um relativ gleichmäßige Bilder mit ausreichender Detailgenauigkeit zu gewährleisten, wurden alle Bilder unter 200x200 px entfernt.

¹ <https://github.com/tumcms/Labelbox2DetectNet>

Um einen umfassenden Algorithmus zu trainieren, wurden zusätzliche Klassen baustellenrelevanter Objekten hinzugefügt (Tabelle 1). Die Daten aus dem Caltech 256 Datensatz benötigen keine weitere Vorbereitung (GRIFFIN, HOLUB, AND PERONA 2007).

Tabelle 1: Klassen und Anzahl der Bilder für das Training eines Klassifizierungs-CNNs

Klasse	Herkunft	Anzahl	Klasse	Herkunft	Anzahl
Fass	Caltech 256	47	Schalung	Eigene Daten	1410
Bulldozer	Caltech 256	110	Schraubendreher	Caltech 256	102
Auto	Caltech 256	123	Schubkarre	Caltech 256	91
Stuhl	Caltech 256	62	Maulschlüssel	Caltech 256	39

In Digits wurden alle Bilder auf 256x256 px skaliert, da GoogLeNet für Bilder dieser Größe optimiert ist. DIGITS teilt die Daten automatisch in Trainings- und Validierungsdaten. Das CNN konvergiert schnell zu einer hohen Genauigkeit (Top-1-Fehler) um 85% und stagniert nach 100 Epochen bei 90% (siehe Abbildung 5). Für höhere Genauigkeiten in allen Klassen könnten zusätzliche Bilder zu den unterrepräsentierten Klassen hinzugefügt werden.

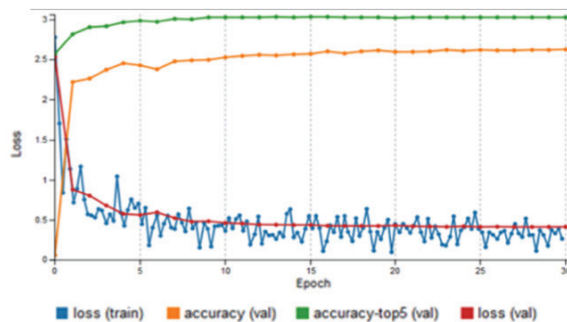


Abb. 5: Genauigkeit (Top-1 und Top-5 Fehler) des GoogLeNets nach 30 Trainingsepochen

4.3 Objekterkennung

Um mehrere Schalungselemente in einem Baustellenbild zu erkennen, wird ein in Caffe implementiertes CNN mit DetectNet-Architektur verwendet. Um die Trainingszeit zu reduzieren, werden die Gewichte des „BVLC GoogLeNet-Modells“² verwendet, das auf ImageNet-Daten vortrainiert wurde. Das Training wird mit dem Adam Solver durchgeführt. Für DetectNet wurden die Bilder in Patches von 1248 x 384 Pixel zerlegt und in 85% Trainings- und 15% Validierungsdaten aufgeteilt (Abbildung 4 c).

Das CNN wurde zweimal mit jeweils 300 Epochen trainiert, wobei die zweite Trainingsrunde nur geringfügige Verbesserungen brachte. Genauigkeit und Ausfall schwanken um 65%, der

² <https://github.com/NVIDIA/DIGITS/tree/master/examples/object-detection>

mAP um 45% (Abbildung 6) – einige Elemente werden nicht oder falsch erkannt. In Abbildung 7 ist die resultierende Begrenzungsbox für ein Beispielbild dargestellt – hier wurde ein gutes Ergebnis erlangt.

Schritte zur Verbesserung der Ergebnisse erfordern eine umfangreichere Vorverarbeitung der Daten, längere Trainingsperioden und Anpassungen sowohl der Netzwerkarchitektur als auch der Lösungsalgorithmen.

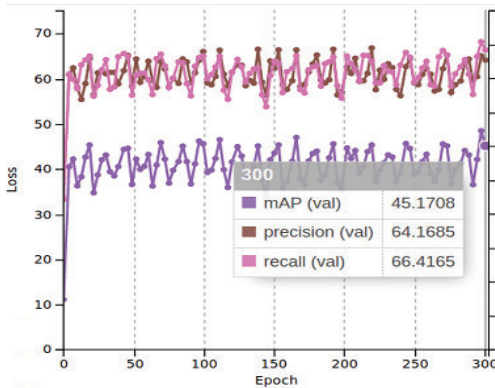


Abb. 6: Genauigkeit, Ausfall und mAP des DetectNets nach 2 mal 300 Trainingsepochen



Abb. 7: Erkanntes Begrenzungsrechteck für ein Schalungselement

5. Zusammenfassung

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Bildanalyse von Baustellenbildern. Um maschinelle Vorhersagen über die auf einem Bild dargestellten Konstruktionselemente zu treffen, können Algorithmen des maschinellen Lernens trainiert werden. Hier wird zunächst der aktuelle Stand der Technik im Bereich des maschinellen Lernens vorgestellt und die Algorithmen auf ihre Eignung für die Anwendung im Bereich des Bauwesens hin untersucht. Dann werden diese Ansätze auf Baustellenelementen getestet. Für das Training wurden 750 Bilder von Baustellen gelabelt, woraus knapp 10.000 beschriftete Schalungselemente resultieren. Die Bilder wurden als Eingabe für verschiedene Klassifizierungs- und Erkennungsalgorithmen verwendet, was zu sehr hohen Erfolgsraten für die Klassifizierung von Einzelobjektbildern und befriedigenden Erfolgsraten für die Objekterkennung auf Mehrobjektbildern führte. Da die Objekterkennung aktuelles Forschungsobjekt einer großen Gemeinschaft von Forschern ist, bieten die Ergebnisse einen vielversprechenden Ausgangspunkt für zukünftige Verbesserungen.

6. Danksagungen

Diese Arbeit wird von der Bayerischen Forschungsförderung im Rahmen des Forschungsprojekts 1156-15 unterstützt. Wir danken dem Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (BAdW) für die Unterstützung und Bereitstellung von Hochleistungsrecheninfrastrukturen, die für diese Publikation genutzt wurden.

Literatur

- ALBELWI, SALEH, AND AUSIF MAHMOOD. 2017. "A Framework for Designing the Architectures of Deep Convolutional Neural Networks." *Entropy* 19 (6): 242. doi:10.3390/e19060242.
- BRAUN, ALEXANDER, SEBASTIAN TUTTAS, ANDRÉ BORRMANN, AND UWE STILLA. 2015. "A Concept for Automated Construction Progress Monitoring Using BIM-Based Geometric Constraints and Photogrammetric Point Clouds." *ITcon* 20: 68–79.
- BRAUN, ALEXANDER, SEBASTIAN TUTTAS, UWE STILLA, AND ANDRÉ BORRMANN. 2018. "Process- and Computer Vision-Based Detection of as-Built Components on Construction Sites." In *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining*, 7.
- BUDUMA, NIKHIL. 2017. *Fundamentals of Deep Learning : Designing Next-Generation Machine Intelligence Algorithms*. Vol. 44. doi:10.1007/s13218-012-0198-z.
- GIRSHICK, ROSS. 2015. "Fast R-CNN." In *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 1440–48. IEEE. doi:10.1109/ICCV.2015.169.
- GOLPARVAR-FARD, MANI, F PENA-MORA, AND S SAVARESE. 2009. "D4AR - a 4 Dimensional Augmented Reality Model for Automation Construction Progress Monitoring Data Collection, Processing and Communication." *Journal of Information Technology in Construction* 14 (June): 129–53.
- GRIFFIN, G., A. HOLUB, AND P. PERONA. 2007. "Caltech-256 Object Category Dataset." http://www.vision.caltech.edu/Image_Datasets/Caltech256/.
- HAN, KEVIN K., AND MANI GOLPARVAR-FARD. 2017. "Potential of Big Visual Data and Building Information Modeling for Construction Performance Analytics: An Exploratory Study." *Automation in Construction* 73 (January): 184–98. doi:10.1016/j.autcon.2016.11.004.
- HE, KAIMING, XIANGYU ZHANG, SHAOQING REN, AND JIAN SUN. 2016. "Deep Residual Learning for Image Recognition." In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 770–78. IEEE. doi:10.1109/CVPR.2016.90.
- KRIZHEVSKY, ALEX, ILYA SUTSKEVER, AND GEOFFREY E. HINTON. 2017. "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks." *Communications of the ACM* 60 (6): 84–90. doi:10.1145/3065386.
- KROPP, CHRISTOPHER, CHRISTIAN KOCH, AND MARKUS KÖNIG. 2018. "Interior Construction State Recognition with 4D BIM Registered Image Sequences." *Automation in Construction* 86 (February): 11–32. doi:10.1016/j.autcon.2017.10.027.
- LECUN, YANN, YOSHUA BENGIO, AND GEOFFREY HINTON. 2015. "Deep Learning." *Nature* 521 (7553): 436–44. doi:10.1038/nature14539.
- NVIDIA. 2018. "Nvidia Digits - Deep Learning Digits Documentation," no. May.
- REDMON, JOSEPH, SANTOSH DIVVALA, ROSS GIRSHICK, AND ALI FARHADI. 2016. "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection." In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779–88. IEEE. doi:10.1109/CVPR.2016.91.
- REDMON, JOSEPH, AND ALI FARHADI. 2017. "YOLO9000: Better, Faster, Stronger." In *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 6517–25. IEEE. doi:10.1109/CVPR.2017.690.
- YOLOv3. 2018. "YOLOv3: An Incremental Improvement," April.
- REN, SHAOQING, KAIMING HE, ROSS GIRSHICK, AND JIAN SUN. 2017. "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks." *IEEE Transactions*

- on Pattern Analysis and Machine Intelligence 39 (6): 1137–49. doi:10.1109/TPAMI.2016.2577031.
- RUSSAKOVSKY, OLGA, JIA DENG, HAO SU, JONATHAN KRAUSE, SANJEEV SATHEESH, SEAN MA, ZHIHENG HUANG, et al. 2015. “ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge.” *International Journal of Computer Vision* 115 (3): 211–52. doi:10.1007/s11263-015-0816-y.
- SZEGEDY, CHRISTIAN, WEI LIU, YANGQING JIA, PIERRE SERMANET, SCOTT REED, DRAGOMIR ANGUELOV, DUMITRU ERHAN, VINCENT VANHOUCHE, AND ANDREW RABINOVICH. 2015. “Going Deeper with Convolutions.” In *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1–9. IEEE. doi:10.1109/CVPR.2015.7298594.
- TAO, ANDREW, JON BARKER, AND SRIYA SARATHY. 2016. “DetectNet: Deep Neural Network for Object Detection in DIGITS.” <https://devblogs.nvidia.com/detectnet-deep-neural-network-object-detection-digits/>.
- YEAGER, LUKE. 2015. “DIGITS: The Deep Learning GPU Training System.” *ICML AutoML Workshop*.

Kamerabasierte Rauigkeitsbestimmung von Bauteiloberflächen

Baris Özcan

Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme ·
RWTH Aachen University · Mies-van-der-Rohe-Straße 1 · 52074 Aachen ·
E-Mail: oezcan@gia.rwth-aachen.de

Die Rauigkeit von Betonoberflächen spielt bei der Bestandsbeurteilung und Sanierungsplanung von Oberflächen, im vorliegenden Fall in erster Linie von Betonbauteilen, eine wesentliche Rolle. So müssen die Bauteile vor der Sanierung ein bestimmtes Maß an Rauigkeit aufweisen. Bisherige Verfahren zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit sind insbesondere das Sandflächenverfahren nach Kaufmann oder der Reifenprofilmesser. Beide analoge Techniken sind zwar einfach und schnell in der Durchführung, haben jedoch maßgebende Mängel. Die Nachteile der Verfahren sind beispielsweise die fehlende Reproduzierbarkeit der Ergebnisse oder die Durchführbarkeit an stark geneigten Flächen und Decken.

In einem Forschungsprojekt wird daher eine neue kamerabasierte Methode entwickelt, um die Rauigkeit von Betonoberflächen zuverlässig und reproduzierbar bestimmen zu können. In diesem Beitrag wird das Verfahren zur automatisierten Rauigkeitsbestimmung auf der Basis von digitalen Bildaufnahmen vorgestellt. Zunächst wird in einem zweistufigen Prozess eine Punktwolke der Objektoberfläche erzeugt. Die erste Phase beinhaltet die Wiederherstellung der exakten Aufnahmegeometrie, während in der zweiten Phase die dichte Punktwolke generiert wird. Diese Punktwolke kann schließlich verwendet werden, um verschiedene Rauigkeitsparameter abzuleiten. Die gesamte Bildverarbeitung wird in einem automatisierten Workflow auf der Basis der freien Programmbibliothek OpenCV und selbst entwickelten Auswertroutinen implementiert. Im Beitrag werden das Konzept, der gesamte Bildverarbeitungsablauf sowie erste Auswertergebnisse vorgestellt.

Keywords: Rauigkeit, Structure from Motion, Dense Image Matching, Photogrammetrie

1 Einleitung

Die Rauigkeit von Betonoberflächen spielt bei der Bestandsbeurteilung und Sanierungsplanung eine wichtige Rolle, da die Rauigkeit unter anderem die Verbundfähigkeit von Alt- und Neubeton signifikant beeinflusst. Zur Messung der Betonoberflächenrauigkeit hat sich bisher das Sandflächenverfahren nach KAUFMANN (1971) etabliert. Hierbei wird eine bestimmte Menge an Sand auf die zu messende Oberfläche ausgebracht und kreisförmig verteilt, bis es sich nicht mehr verteilen lässt. Durch die Ermittlung des Durchmessers des Sandflecks kann anschließend ein Rauigkeitswert abgeleitet werden. Obwohl das Verfahren sehr einfach in der Durchführung ist, weist es maßgebende Mängel auf. Beispielsweise ist die Anwendung auf geneigten Flächen oder Decken nicht möglich. Außerdem liefert die Methode bei wiederholter Anwendung verfahrensbedingt nicht exakt die gleichen Ergebnisse. Ein weiteres einfaches Verfahren zur Rauigkeitsmessung ist der Reifenprofilmesser (LENZ & ZILCH 2016), der ähnlich wie bei der Profiltiefenmessung von Fahrzeugreifen

angewandt wird. Diese Methode bietet allerdings nur eine punktuelle und grobe Messung der Rauigkeit. Außerdem erfordern sowohl das Sandflächenverfahren als auch der Reifenprofilmesser eine direkte Berührung mit der Objektoberfläche. Der Kontakt mit der zu vermessenden Oberfläche bringt jedoch Nachteile mit sich. Beispielsweise kann die Oberfläche verschlissen bzw. verändert werden, so dass das Ergebnis verfälscht wird.

Daher wird im Rahmen eines Forschungsprojekts ein neues automatisiertes System entwickelt, welches die berührungsfreie Rauigkeitsermittlung ermöglicht. In diesem Beitrag wird das kamerabasierte Verfahren, welches die Objektoberfläche flächenhaft erfasst und anschließend einen Rauigkeitswert daraus ableitet, vorgestellt. Die Software zur 3D-Rekonstruktion der Objektoberfläche basiert auf der freien Programmbibliothek OpenCV.

2 Bildbasierte 3D-Rekonstruktion

Die bildbasierte 3D-Rekonstruktion besteht aus einem zweistufigen Prozess, dem Structure from Motion, mit der man zunächst die exakte Kamerageometrie rekonstruiert, und dem Dense Image Matching, welches mithilfe der rekonstruierten Kamerageometrie eine dichte dreidimensionale Punktwolke der Objektoberfläche erstellt. Anschließend kann diese Punktwolke verwendet werden, um die Oberfläche des aufgenommenen Objekts zu analysieren. Im Folgenden wird auf die Bildaufnahme und die beiden Prozessierungsstufen zur dichten 3D-Rekonstruktion eingegangen und die Funktionsweise erläutert.

2.1 Bildaufnahme

Von dem zu vermessenden Objekt werden zunächst photogrammetrische Bilder aufgenommen. Die Aufnahmen müssen das Objekt von verschiedenen Richtungen abbilden, wobei ein gewisses Maß an Überlappung der einzelnen Bilder notwendig ist (üblicherweise 60 - 80 %). Hierbei ist darauf zu achten, dass sich die innere Orientierung der Kamera, z. B. die Brennweite, nicht ändert. Die innere Orientierung einer Kamera beschreibt die Lage des Projektionszentrums der Kamera relativ zur Bildebene und bestimmt somit die Abbildungseigenschaften der Kamera.

2.2 Structure from Motion

Beim Structure from Motion (SfM) werden als Erstes mithilfe von Interest-Operatoren markante Punkte in den Bildern identifiziert und homologe Punkte in unterschiedlichen Bildern einander eindeutig zugeordnet. Durch die Bildpunktkorrespondenzen von zwei Bildern und unter Einfluss der intrinsischen Kameraparameter kann anschließend eine Essential-Matrix geschätzt werden. Diese beschreibt die relative Lage zweier Bilder zueinander und kann jeweils in einen Rotations- und Translationsanteil zerlegt werden. Unter Kenntnis der relativen Orientierung zweier Bilder können anschließend ausgehend von den Bildpunkten und dem optischen Zentrum der Kamera die Raumstrahlen berechnet werden. Der Objektpunkt, der von den jeweiligen Bildpunkten abgebildet wurde, liegt dann idealerweise dort im Raum, wo sich zwei Raumstrahlen schneiden. Dieser Vorgang ist auch als räumlicher Vorwärtsschnitt oder Triangulation bekannt. Dadurch erhält man ebenfalls die räumlichen Objektpunktkoordinaten zu den einzelnen Bildpunkten. Nachdem zu einem initialen Bildpaar die relative Orientierung und die Objektpunktkoordinaten gefunden wur-

de, wird für jedes weitere Bild die räumliche Orientierung mithilfe des räumlichen Rückwärtsschnitts berechnet und die Bildpunkte des neuen Bildes mit den Bildpunkten der bereits orientierten Bilder im Raum verschnitten. Nachdem man alle Bilder auf diese Weise orientiert und die Objektpunkte der gemessenen Bildpunkte ermittelt hat, werden alle Parameter (Kameraorientierung und Objektpunkte) in einem Bündelblockausgleichungsverfahren derart optimiert, dass die Abstandsquadrate der Rückprojektionen der Objektpunkte auf die Bildebene zu den initial ermittelten Bildpunkten minimiert wird.

2.3 Dense Image Matching

Das Ziel des Dense Image Matching (DIM) – oder auch dichte Punktzuordnung – ist es zu jedem Bildpunkt eines Bildes einen korrespondierenden Bildpunkt, der den gleichen Punkt in der Szene abbildet, in einem zweiten Bild zu finden. Unter Kenntnis der Aufnahmegeometrie der Kameras werden die Bilder zunächst paarweise ins Stereonormalfall transformiert. Bei den resultierenden Normalbildern liegen homologe Bildpunkte in der gleichen Bildzeile, sodass sich eine Korrespondenzanalyse erheblich vereinfacht. Für das Matching gibt es in der Literatur diverse Ansätze, die im Wesentlichen auf lokalen und globalen Optimierungsverfahren basieren. Auf diese wird in diesem Beitrag nicht im Detail eingegangen. Der interessierte Leser sei hierfür auf weiterführendes Material verwiesen (u.a. BEBEŞELEA-STERP 2017, BRAD & BRAD 2017).

3 3D-Rekonstruktion der Oberfläche einer Betonprobe

Von einer Betonprobe mit der Größe von 17,5 cm x 12 cm wurden mit der Spiegelreflexkamera Nikon D800E und einem Makroobjektiv mäanderförmig hochauflösende Bilder aufgenommen. Der Aufnahmeabstand betrug in etwa 3 cm und der Überlappungsbereich der Bilder weist ca. 80 % auf. Die Aufnahmen haben eine Auflösung von 7360 x 4912 Pixeln. In der unteren Abbildung 1 ist eine Auswahl der Bilder dargestellt.



Abb. 1:
Photogrammetrische Bildaufnahmen einer Betonprobe

Für den gesamten Ablauf zur Rekonstruktion einer dichten Punktwolke wurde eine eigene Software auf Basis der freien Programmbibliothek OpenCV entwickelt. Die Software verarbeitet als Eingabe photogrammetrisch aufgenommene Bilder und Näherungswerte für die intrinsische Kameraorientierung und liefert als Ausgabe eine dichte zusammenhängende Punktwolke der Objektoberfläche.

Zunächst rekonstruiert die Software mittels SfM sowohl die Kamerageometrie zum Aufnahmezeitpunkt als auch eine dünne Punktwolke der Betonoberfläche. Anschließend wird eine Bündelblockausgleichung durchgeführt, in der sowohl die innere und äußere Orientierung der Kameras als auch die Koordinaten der geschätzten Objektpunkte verbessert werden. Abbildung 2 zeigt die resultierende Kameraorientierung und die dünne Punktwolke nach der Bündelblockausgleichung.

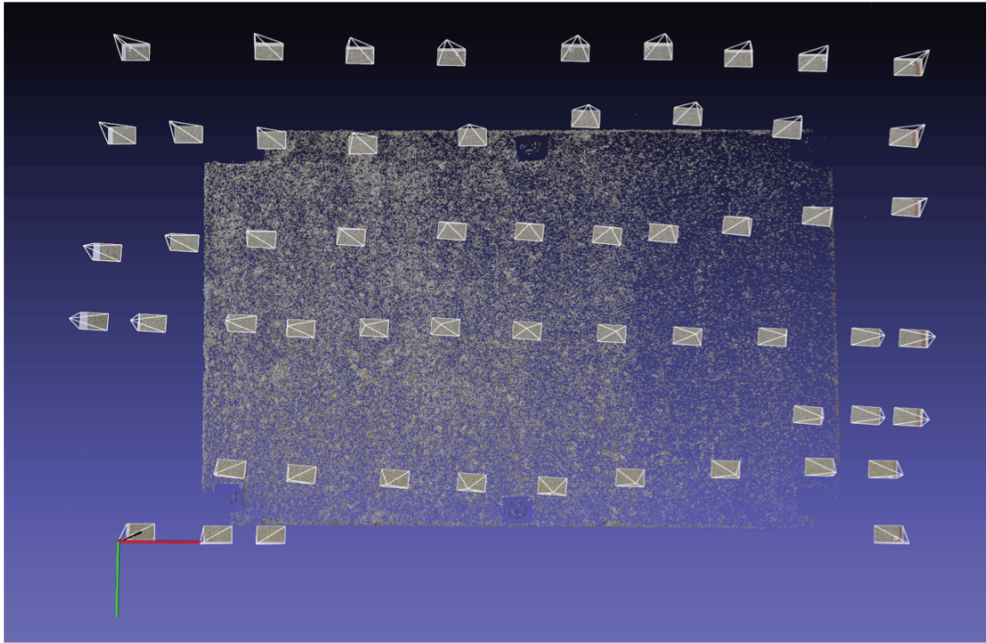


Abb. 2: Dünne Punktwolke der Betonoberfläche und rekonstruierte Aufnahmegeometrie der Bilder

Anschließend werden auf Basis der ermittelten Kamerageometrie die Bilder jeweils paarweise ins Stereonormalfall transformiert. Mithilfe des DIM wird dann aus diesen Normalbildern eine dichte Punktwolke rekonstruiert. Als Strategie für das Dense Image Matching wurde hierbei das Semi-globale Matching nach HIRSCHMÜLLER (2008) verwendet, da der Algorithmus die Vorteile des globalen Matchings (hohe Genauigkeit) und Vorteile des lokalen Matchings (geringe Laufzeitkomplexität) vereinigt. Die rekonstruierte dichte Punktwolke ist in Abbildung 3 dargestellt.

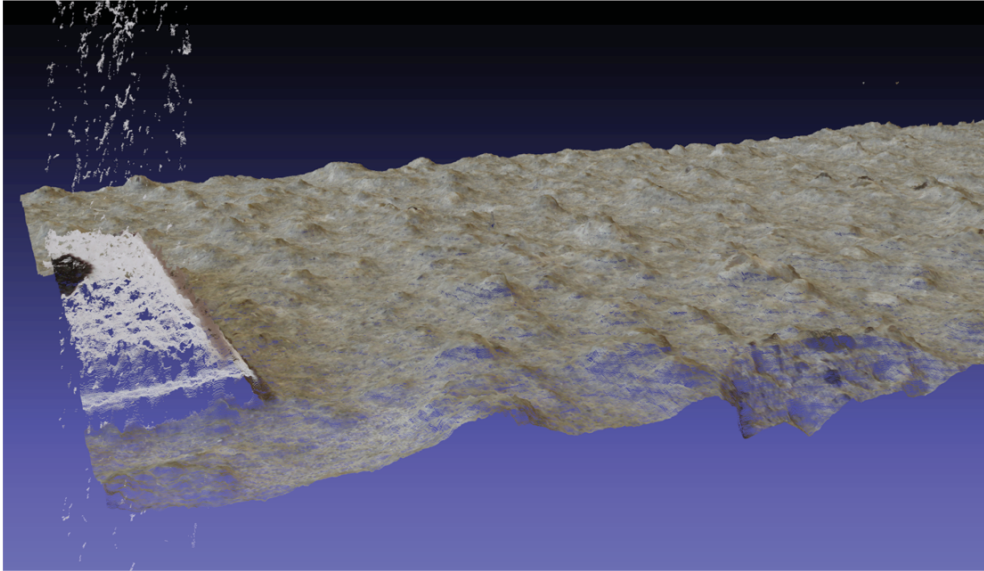


Abb. 3: Rekonstruierte dichte Punktwolke der Betonoberfläche

4 Fazit & Ausblick

Erste Versuchsergebnisse zeigen, dass eine zuverlässige und genaue 3D-Rekonstruktion der Betonprobe möglich ist. Durch die texturreiche Betonoberfläche und der hohen Bildauflösung der Aufnahmen wird eine dichte Punktzuordnung der Bildpunkte vereinfacht, sodass diese mit kaum Mehrdeutigkeiten zugeordnet werden können.

Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens ist die berührungslose Messung der Objektoberfläche. Somit wird eine Veränderung oder Beschädigung der Oberflächenstruktur durch den Messvorgang ausgeschlossen. Außerdem bietet das Verfahren eine flächenhafte Erfassung der Oberfläche, so dass sie hinsichtlich der Rauigkeit auf verschiedene Art und Weise analysiert werden kann. Es können bereits vorhandene Verfahren, wie z. B. das Sandflächenverfahren, simuliert werden oder auch neuartige Parameter eingeführt werden, die sich für eine flächenhafte Beschreibung der Oberflächenrauigkeit besser eignen. Darüber hinaus sind unter gleichbleibenden Voraussetzungen reproduzierbare Ergebnisse zu erwarten.

Sichtbar sind jedoch ebenfalls die Grenzen des Verfahrens, da beispielsweise auf der weißen texturlosen Marke (Abb. 3) die ermittelten 3D-Punkte stark streuen. Zudem ist die Laufzeit des Semi-globalen Matchings auf einer CPU vergleichsweise hoch, so dass es zu einer Rechendauer von 20 Sekunden und mehr pro Bildpaar bei hochauflösenden Bildern kommt. Mit einer Grafikkarten-unterstützten (GPU) Berechnung wird derzeit an der Beschleunigung des Verfahrens gearbeitet.

Literatur

- KAUFMANN, N. (1971), Ein einfaches Verfahren zur Messung und Beurteilung der Textur von Fahrbahnoberflächen. In: Straßenbautechnik, 3, 131-135.
- LENZ, P. & ZILCH, K. (2016), Digitale Bestimmung der Rauheit – Potenziale für Schubfugen. In: Bauingenieur 91, 6, 248-258.
- BEBEŞELEA-STERP, E., BRAD, R. & BRAD, R. (2017), A Comparative Study of Stereovision Algorithms. In: International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 8 (11), 2017.
- HIRSCHMÜLLER, H. (2008), Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30 (2), 2008.

Schlieren Imaging and Analysis

Amayu Wakoya Gena

Department of Building Physics · Bauhaus University Weimar, Coudraystraße 11a · 99423 Weimar
E-Mail: amayu.wakoya.gena@uni-weimar.de

Schlieren imaging system is a technique used to visualize density variation in transparent media. In this study, a thermal manikin is used to simulate heat release from human body. This heat release results in a convective air flow (thermal plume) to be visualized. Schlieren video frames (schlieren images) were analyzed using MATLAB's opticalFlowFarneback algorithm. This algorithm is an approach to estimate the direction and speed of objects in motion from one image or video frame to another. After analyzing the images, the velocity of the thermal plume above manikin's head is approximately comparable to measurements with conventional methods.

Keywords: Schlieren Imaging, Human Thermal Plume, Thermal Manikin, OpticalFlowFarneback

1 Introduction

The human body can be viewed as an engine using food as fuel. Similar to any other engine, it generates waste heat being rejected to the environment. The rate of heat generation mainly depends on the level of activity. At an ordinary level of activity, the average person can generate between 160W and 200W of thermal energy (AULICIEMS & SZOKOLAY 1997). Human body releases this heat to the environment through a combination of conduction, radiation, convection, evaporation and respiration. Convection depends on the temperature difference between the body's surface and the surrounding air and results in a thermal plume (CRAVEN & SETTLES 2006). The thermal plume generated from a human body due to natural convection has a significant impact on indoor air quality and thermal comfort. To make this air flow visible, schlieren imaging system is a promising application. *Schliere* (singular) is a German word meaning *Streak*. Schlieren imaging system is a method used to visualize density variation in transparent media. Originally, it was invented by the German physicist August Toepler in 1864 to study fluid flow and shock waves.

Nowadays, it is for example used in aeronautical engineering to visualize the flow of air around objects. Recently, it has been used in different areas, such as human exhalation (XU et al. 2017), Background-oriented schlieren visualization of heating and ventilation flows (HARGATHER & SETTLES 2011), human cough for aerosol infection (TANG et al. 2009) and investigation of gas jets (ZHENG et al. 2016). In this paper, schlieren imaging system is used to visualize the flow of thermal plume. And then, using MATLAB algorithm the optical flow and velocity of the thermal plume was measured.

2 Basic Concept of Light Propagation through Inhomogeneous Media

Schlieren imaging capitalizes the refraction of light to visualize air flow. Refraction is the bending of a wave when it enters a medium in which its speed is different. If the media

through which light propagates is homogeneous (such as a vacuum) the light ray is straight and undisturbed, it travels uniformly at a constant velocity. But, when the media are inhomogeneous, light rays refract and deflect from their continuous path creating a schlieren. When light rays travel from a low dense medium to a high dense medium, it bends toward the normal to the boundary between the two media. The level of bending depends on the indices of refraction of the two media; it is described quantitatively by Snell's Law. The refractive index is defined as $n = c_0/v$, where n is the refractive index, c_0 is universal speed of light, 3×10^8 m/s and v is the local light speed. Schlieren are a gradient disturbance in inhomogeneous transparent media. It and can be visualized in terms of Huygens's principle: which states that light rays, are always normal to the local speed of light, are bent toward the zone of higher refractive index (zones of higher density in gases).

For the formation of Schlieren, the bending or refraction of light rays are crucial. Considering the z-axis of a right-handed Cartesian x, y, z coordinate system as the "normal" direction (see Fig. 1), which is the direction of undisturbed rays approaching a zone of inhomogeneity. In figure 1, the light experiences a negative vertical refractive-index gradient $dn/dy < 0$ but no gradient in the x- or z-directions. A planar wavefront of light is initially vertical up on passing through z_1 , is thus normal to the horizontal optical centerline z. As this wavefront propagates through the schlieren object from z_1 to z_2 , it covers the differential distance Δz in differential time Δt and is refracted through the differential angle $\Delta \epsilon$. Since light rays always point normal to their wavefronts, the horizontal ray originally passing through z_1 is likewise refracted through differential angle $\Delta \epsilon$.

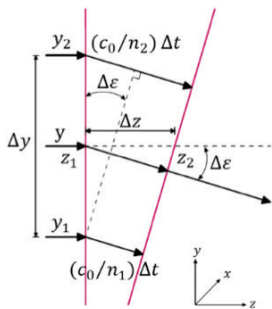


Fig. 1:

Diagram of elemental light refraction by a refractive index gradient dn/dy .

From Snell's law, local value of the light speed c is c_0/n ,

By examining Figure 1,

$$\sin(\Delta \epsilon) \approx \Delta \epsilon = \frac{(c_0/n_2) - (c_0/n_1)}{\Delta y} \Delta t \quad (1)$$

$$\text{Also, } \Delta t = \Delta z \frac{n}{c_0} \quad (2)$$

By combining equation (1) and (2),

$$\Delta \epsilon = \frac{n}{n_1 n_2} \frac{(n_1 - n_2)}{\Delta y} \Delta z \quad (3)$$

To simplify more, the term $\frac{n}{n_1 n_2}$, in equation (3) can be simplified to $\frac{1}{n}$, as $\Delta y \rightarrow 0$, and letting all the finite differences approach zero, $\Delta z \rightarrow 0$, can be obtain,

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dy} \quad (4)$$

Because ε is a very small angle, it is approximately equivalent to $\frac{dy}{dz}$,

$$\text{Then, } \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} \text{ and } \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (5)$$

Thus, by integrating the angular ray deflection in x and y direction are:

$$\varepsilon y = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial y} dz \text{ and } \varepsilon x = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial x} dz \quad (6)$$

For a 2D schlieren of length L along optical axis (z):

$$\varepsilon y = \frac{L}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y} \text{ and } \varepsilon x = \frac{L}{n_0} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (7)$$

where n_0 is the refractive index of the surrounding medium.

From these expressions, it can be summarized as refraction is caused by gradient $\partial n/\partial y$ and $\partial n/\partial x$ of the refractive index (n), not by overall level of the refractive index (n). Additionally, equation (5) and (6) show light rays are always bent toward the region of higher refractive index (n).

3 Schlieren Imaging System Setup

The schlieren setup in Department of Building Physics called single mirror optical system, because it uses a single spherical field mirror (see Figure 2). The setup consists of four elements, (1) single concave spherical mirror (for properties see table 1), (2) LED light source, (3) knife-edge and (4) a digital camera

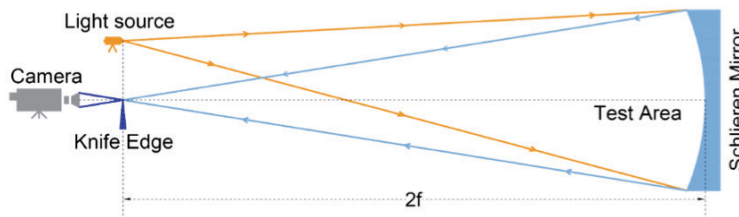


Fig. 2: Setup of single mirror schlieren imaging system, (where $2f = 6000\text{mm}$, twice of the focal length of the mirror).

In this setup (see Fig. 2), a 550 lumen LED light source is positioned behind a 1000-micron pinhole. This light source is placed on-axis of a concave spherical mirror at its radius of curvature ($R = 2f$, where f is the focal length of the mirror, $f \approx 3000\text{mm}$). Then the diverging light beam from the light source fills the mirror and returns along the coincident path. Some rays are refracted on the way back from the mirror, also they do not end up at the focal point, but this minor difficulty is overcome by using a knife-edge to deflect those rays. Then the

returning light rays enters to the imaging machine (camera) where the schlieren image is captured (in this case, using a Canon EOS5DR with a 50mm f/2.0 lens). The test area lies directly in front of the mirror.

Table 1: The schlieren Mirror Specification

Parameter	Specification
Material	Astrositall
Type	Concave spherical
Mechanical Ø	1014.8mm
Optical Ø	1002mm
Focal Length	3001.5mm
Radius curvature	6003mm
Coating	Al + SiO ₂
Edge thickness	114.4mm
Surface accuracy	Λ / 9.75 @ 633 nm
Micro roughness	2.7nm rms
Cleanliness	100/80 scratch / dig

4 Measurements

4.1 Capturing Sample Data

The human thermal plume was investigated as an example in this study. A thermal manikin was used to simulate heat release from human body. The thermal manikin has a complex male body shape with 1.23m in the upright sitting posture (VOELKER & ALSAAD 2018). For this study, the sitting posture is preferred. The manikin surface temperature was manually set to 34°C to simulate the surface temperature of a human body (skin), with a precision of ±0.2°C., (see figure 3).



Fig. 3: Manikin placed 20 cm in front of Schlieren mirror.

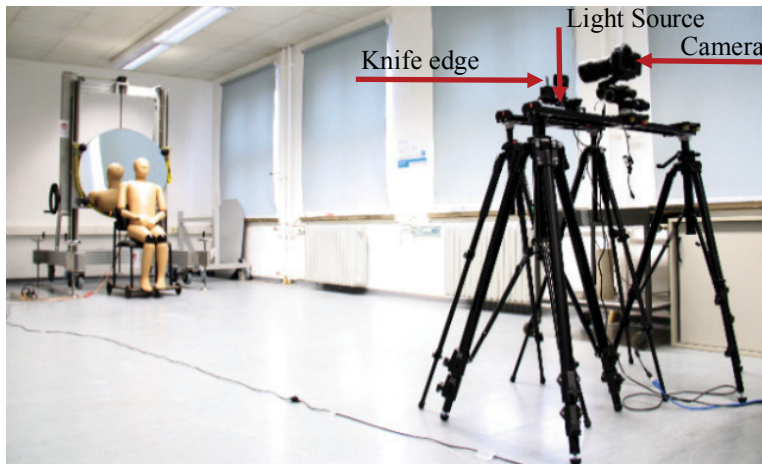


Fig.4: Schlieren imaging system setup at the Department of Building Physics, Bauhaus-University Weimar.

Figure 4 shows the placement of thermal manikin at test area. The thermal manikin was placed approximately 20cm in front of the Schlieren mirror and at the center of the test area. The elevation of the crown height is 1.4m above the floor. The center of mirror is positioned at 1.3m above the floor, which is the same as the height of light source, knife edge and camera. The distance between the mirror and light source is 6m (2f). The knife edge has the same distance as the light source from the mirror and it is positioned as close as possible to the light source, in this case 6.5cm to the left. During the experimental investigation, the laboratory (room) air temperature was around 21 °C and there are no reasons for natural or forced convection besides the manikin and measuring person (the latter being far from the test area). Therefore, the air velocity tended to be almost 0m/s which was controlled by measurements using an anemometer.

4.2 Analyzing sample data

When the light beam from the light source propagates through the test area it travels through two media with different air density: (1) the thermal plume above the manikin with temperature 28.8°C (at 20 mm above manikin), less dense medium and lower refractive index and (2) the air in the laboratory with around 21°C, denser medium and higher refractive index. This light refraction due to varying densities of the air lead to the occurrence of schlieren, which helps to visualize the convective heat release of the thermal manikin (see figure 5). To capture the occurrence of schlieren, the camera was set manually to shutter speed: 1/1600 second, ISO: 1000 and aperture F2.0, these settings are chosen to shoot high quality images with a correct exposure in low light (indoor light) and while the object is in motion (in this case the convective heat release of the thermal manikin). Then, a 45 seconds schlieren video was recorded with frame rate: 50frame/second, frame width 1280 pixel and 720 pixels in height. The recorded video has 2,250 frames (45 seconds x 50 frames). From this video, image_01 (at time $t = 20.02$ seconds), and image_03 (at time $t = 20.04$ seconds) are randomly and sequentially selected for optical flow estimation, (see figure 5). Then the selected images were analyzed using MATLAB's opticalFlowFarneback algorithm to estimate the motion

and velocity of the thermal plume above the thermal manikin, (see figure 6 and figure 7, respectively).

OpticalFlowFarneback algorithm is a MATLAB algorithm used to estimate the direction and speed of an object's motion from one image or video frame to another. It generates an image pyramid, where each level has a lower resolution compared to the previous level (FARNEBACK 2002). The algorithm forms each pyramid level by down sampling the previous level. The tracking begins at the lowest resolution level and continues tracking until convergence. The optical flow algorithm propagates the result of that level to the next level as the initial guess of the point locations. This way, the algorithm refines the tracking with each level, ending with the original image. Using the pyramid levels enables the optical flow algorithm to handle large pixel motions, which can be distances greater than the neighborhood size.

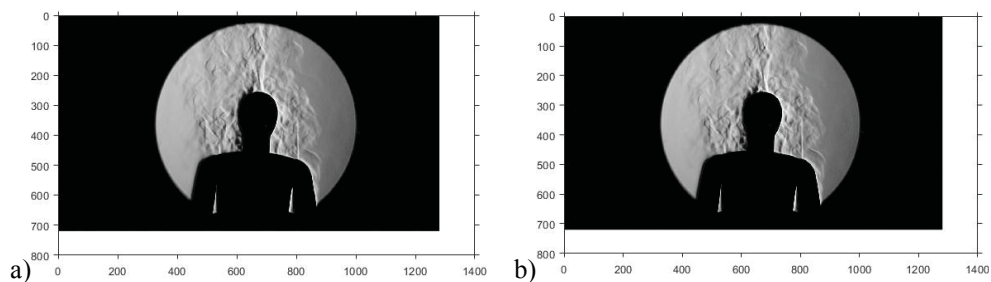


Fig. 5: a) image_01, b) image_02, (width 1280 pixel and 720 pixels in height) selected from the recorded video targeted to visualize the thermal plume above the manikin.

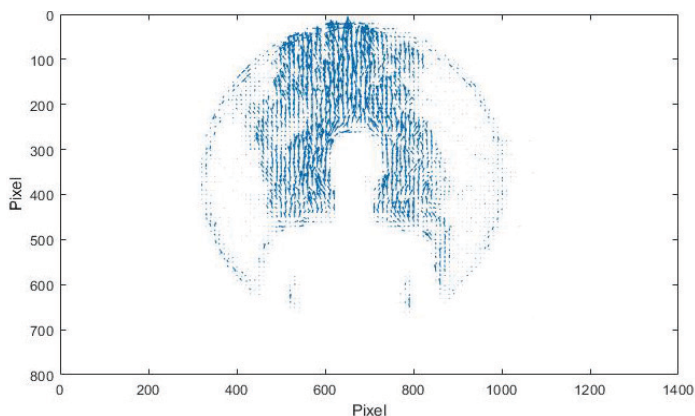


Fig. 6: Optical flow between image_01 and image_02.

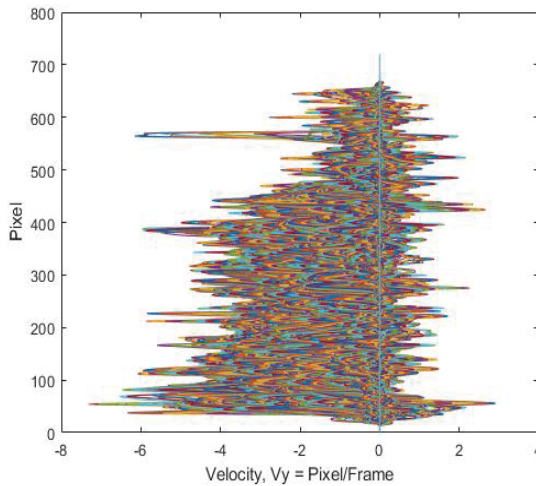


Fig. 7: Vertical air velocity (V_y) of figure 6.

Furthermore, Figure 6 shows, there is a displacement of pixels between image_01 and image_02. Each curve shows the displacement of each pixel of image_01 per frame. In this case the maximum displacement is around 8 pixels in y-axis (see figure 7). The velocity of optical flow is defined in terms of (V_x , V_y) while, x and y are components of velocity. There are no horizontal air velocity (V_x) besides small turbulences within the vertical flow, as a result displacement along x-axis not considered. Only the velocity along y-axis, the vertical flow (thermal plume) is calculated. From the recorded video, the time interval between each frame is 20 milliseconds, with simple calculation, the average vertical velocity component (V_y) of thermal plume is around 0.1m/s.

Even though this result is measured at 21°C and computed by opticalFlowFarneback algorithm is failed to confirms the study by (VOELKER et al. 2014), the velocity of plume above human head is between 0.2m/s - 0.3m/s at 30°C and 18°C respectively, the algorithm has shown that, the potential of optical flow to estimate motion and speed from schlieren images.

5 Conclusion

In this study, (1) the concept of schlieren imaging system and setup was discussed. (2) As an example, the air velocity of a thermal plume was investigated. To estimate the air velocity and direction of flow of thermal plume above manikin, optical flow visualization using opticalFlowFarneback algorithm was implemented. The velocity of the thermal plume was measured 0.1m/s. In future, different approaches of image analyzing method will be investigated. In general, the result shows schlieren imaging system is a promising approach to visualize and measure convective air flows.

6 Literature

- AULICIEMS, A. & SZOKOLAY, S. (1997), Thermal comfort: passive and low energy architecture international in association with dept. Of architecture, university of queensland.
- CRAVEN, B. & SETTLES, G. (2006), A computational and experimental investigation of the human thermal plume. *Journal of fluids engineering*, 128(6), 1251.
- HARGATHER, J. M. & SETTLES, G. (2011), Background-oriented schlieren visualization of heating and ventilation flows: hvac-bos(hvac&r research 17(5)), 771–780.
- TANG, J. W., LIEBNER, T. J., CRAVEN, B. A. & SETTLES, G. S. (2009), A schlieren optical study of the human cough with and without wearing masks for aerosol infection control. *Journal of the royal society, interface*, 6 supply 6, 727-736.
- VOELKER, C. & ALSAAD, H. (2018), Simulating the human body's microclimate using automatic coupling of cfd and an advanced thermoregulation model. *Indoor air*.
- XU, C., NIELSEN, P. V., LIU, L., JENSEN, R. L. & GONG, G. (2017), Human exhalation characterization with the aid of schlieren imaging technique. *Building and environment*, 112, 190–199.
- ZHENG, Y., WANG, L., NING, W. & JIA, S. (2016), Schlieren imaging investigation of the hydrodynamics of atmospheric helium plasma jets. *Journal of applied physics*, 119(12), 123-301.

Kostengünstige VR-Plattform zur Visualisierung und Begehung von komplexen 3D-Modellen

Christian Eller¹ und Shifan Zhang²

¹ Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen · TU Darmstadt · Franziska-Braun-Straße 7 · 64287 Darmstadt ·

E-Mail: eller@iib.tu-darmstadt.de

² Institut für Werkstoffe im Bauwesen · TU Darmstadt · Franziska-Braun-Straße 7 · 64287 Darmstadt
E-Mail: zhang@wib.tu-darmstadt.de

Die Nutzung von Simulationen und 3D-Modellen steigern nachweislich das Verständnis und erhöhen den Lerneffekt. Eine Anwendung immersiver virtueller Räume zur Darstellung von komplexen oder schwerzugänglichen Fachinhalten ist somit anzustreben. Mit der entwickelten VR-Plattform ist dies über eine webbasierte Anwendung auf jedem internetfähigen Gerät möglich. Durch die Anbindung von WebVR wird virtuelle Realität für das Smartphone, aber auch eine 3D-Ansicht ohne Immersion für Tablets oder Computer möglich. Ein unkomplizierter und kostengünstiger Zugang zu immersiven 3D-Modellen ist dadurch umgesetzt worden. Eine Anwendung für einen gemeinschaftlichen Exkursraum mit hilfreichen Werkzeugen zur Darstellung und Manipulation von 3D-Modellen ist entwickelt worden. Unterschiedliche Nutzergruppen ermöglichen verschiedene Interaktionsrechte, wodurch Führungsrollen durch das Geschehen und Modelle leiten können.

Keywords: Virtuelle Realität, Kollaboration, e-Learning, Unity

1 Einführung

In zahlreichen Themenfeldern der Lehre sowie in vielen Berufsfeldern tauchen komplexe Problemstellungen, Prozesse und abstrakte Vorgänge auf. Diese sind nicht oder teilweise sichtbar und daher schwer verständlich. Viele fachspezifische Inhalte wie zum Beispiel bauphysikalische Konstruktionen und Prozesse sind mit den bisherigen Methoden und Tools abstrakt und schwer verständlich visualisierbar. Zur Verständnissteigerung können Simulationen beitragen und durch Immersion der eindeutige Bezug von Modell zur Problemstellung geschaffen werden. Für eine vollständige Immersion bietet sich die Technologie der virtuellen Realität (VR) an. Mit den neuen Möglichkeiten ist VR nicht nur auf kostspielige Hardware und einen umständlichen Aufbau beschränkt, sondern kann dies über gängige Smartphones genutzt werden. Dies ermöglicht eine neue Form des e-Learnings und Erleben im virtuellen Raum. Um dies zu realisieren ist es notwendig die Technologie zu erweitern. Eine VR-Plattform ist zu entwickeln, die es ermöglicht sich gemeinsam in einem virtuellen Raum aufzuhalten und Sachverhalte zu betrachten, veranschaulichen und zu verstehen.

Mit der Erkenntnis, dass die Simulation und Immersion für die Darstellung von Problemstellungen zu einer Verständnissteigerung und großen Lerneffekt führt (siehe Abschnitt 2), ist es das Ziel virtuelle Realität als Werkzeug für eine Gruppe an Personen bereitzustellen. Dadurch sollen virtuelle Simulationen in einem Raum vereint und durch mehrere Nutzer gleichzeitig verfügbar und wahrnehmbar sein. Eine Nutzung als Lehr- und Lernplattform ist angestrebt. Dabei soll den Nutzern Sachverhalte aufgezeigt und mit Hilfe der modernen Technologien

sowie einem Administrator erklärbar gestaltet werden. Eine einfach zugängliche Plattform, die gleichzeitig die Technologie der virtuellen Realität unterstützt und e-Learning Elemente enthält wird somit betrachtet, die Machbarkeit untersucht und in Teilen umgesetzt.

Das Paper ist folgend organisiert: In Abschnitt 2 wird ein Überblick vorausgegangener und ähnlicher Arbeiten gegeben. Der Abschnitt 3 stellt das Konzept für eine webbasierte VR-Plattform und deren Anforderungen vor. Die Umsetzung des Konzepts in eine lauffähige Plattform wird in Abschnitt 4 geschildert und das Ergebnis in Abschnitt 5 bewertet. Weitere Ideen und nächste Schritte der Umsetzung sind ebenfalls in Abschnitt 5 gelistet.

2 Verwandte Arbeiten

Im Bereich der Medizin wurden bereits früh Untersuchungen zur Lern- und Verständnissteigerung durch die Nutzung von virtuellen Anwendungen durchgeführt. (AI-LIM LEE et al. 2010) und (KOCKRO et al. 2015) zeigen, dass durch die interaktive virtuelle 3D-Simulation in einer Desktopanwendung von unterschiedlichen Problemstellungen, wie z.B. der Sezierung eines Froschkörpers das Verständnis der Nutzer nachweislich gesteigert wird. Es kann ein signifikanter Unterschied zwischen 2D- und 3D-Simulationen festgestellt werden und der Lerneffekt, sowie Akzeptanz steigt durch die Nutzung von VR weiter an, wie auch (DÁVIDEKOVÁ et al. 2017) nachweist. Nach (DÁVIDEKOVÁ et al. 2017) wächst die Nutzung der VR-Technologie in zahlreichen Fach-, Produktions- und Marketingbereichen. Eine optimale Anbindung und leichte Implementierung ist allerdings noch nicht entwickelt worden. Ebenfalls fehlt der gemeinschaftliche Nutzen und werden die Anwendungen auf eine lokale Einzelnutzung ausgelegt.

(MEUNIER et al. 2018) zeigen, dass es sich lohnt aufwendige Umsetzungen von VR-Simulationen und Räumen zur Steigerung des Verständnisses durchzuführen. Sie beschreiben, dass in ihrem Fall eine VR gestützte Planungsbegleitung sinnvoll gewesen ist. Zahlreiche Fehler konnten vermieden werden, da die Fachplaner eindrucksvoll die interdisziplinären Anforderungen und Planungsschritte in 3D-Modellen und Simulationen immersiv und fachübergreifend betrachten konnten. (MEUNIER et al. 2018) betonen den Mehrwert von VR bei Ingenieurmethoden im Planungsbereich und fordern eine einfachere Umsetzung, um diese für die zahlreichen Beteiligten nutzen zu können.

Eine VR-Anwendung als e-Learning Tool ist somit erstrebenswert und nachweislich sinnvoll. Dies hat auch Google erkannt und mit Google Expeditions eine Anwendung für Schulen entwickelt, welche 360° Fotos interaktiv aufbereitet und für Schulklassen nutzbar visualisiert (GOOGLE 2017). Hier können Schüler|innen gemeinsam mit der Lehrkraft einen virtuellen Ausflug in ein Museum oder Kraftwerk unternehmen. Die Lehrkraft übernimmt die Führung und es können visuelle und auditive Informationen an einzelnen Exponaten eingeblendet oder vorgelesen werden. Hier ist ein schnelles gemeinsames Eintauchen angestrebt, doch kommt durch die 360° Grad Fotos nur ein kleiner Möglichkeitsbereich der neuen VR Technologie zum Tragen. Eine freie Bewegung im Raum und Interaktion wird durch diese Fotos nicht ermöglicht. Die Umsetzung eines 3D-Modells wie es (SAMPAIO et al. 2010) beschreiben, für CAD Programme für Fachplaner im Gebäudebau vorschlagen und in VR umgesetzt haben kann durch Google Expedition nicht abgedeckt werden. Genau dies zeigen (SAMPAIO et al. 2010) allerdings für die zukünftige Ausbildung als sinnvolle Steigerung des Fortschritts auf und wünschen sich die Erweiterung „Interaktion“ im virtuellen Raum.

Die vorausgegangenen Arbeiten zeigen, dass ein interaktives Modell zur Darstellung unterschiedlicher Problemstellungen in einem virtuellen Raum mit der größtmöglichen Immersion für die Nutzung in größeren Gruppen als nächster Schritt des e-Learning und Planungsfortschritts umgesetzt werden sollte. Genau hier setzt die Arbeit dieses Papers an.

3 Konzeptionierung

3.1 Anforderungen & Ziele

Eine kostengünstige VR-Plattform zur Steigerung des Lernprozesses benötigt die Möglichkeit mit zahlreichen Nutzern gleichzeitig im virtuellen Raum dieselben Visualisierungen zu erleben. Zusätzlich benötigt man für einen virtuellen Lehrraum unterschiedliche Rechte und Interaktionsmöglichkeiten, damit ein Administrator durch das Geschehen führen kann. Das Modell soll durch diesen Begehrbar sein und für Interaktionen zur Verfügung stehen, während die anderen Nutzer der Immersion folgen und sich frei drehen können. Der Vorteil neben der Verständnissteigerung und des erhöhten Lerneffektes wie in Abschnitt 2 beschrieben, ist das wartungsarme Modell. Dieses Modell wird nicht abgenutzt und jeder Nutzer kann es betrachten, als wäre dieser direkt daneben oder innendrin ohne von anderen Nutzern eingeschränkt zu sein.

Für eine einfache VR-Plattform muss die Möglichkeit geschaffen werden, dass Grundkenntnisse in die VR- und Web-Technologie nicht erforderlich sind und diese schnell und einfach auf verfügbaren Geräten nutzbar ist. Um den Gedanken der kostengünstigen VR-Plattform sicherzustellen, soll keine zusätzliche Hardware oder Software erforderlich sein. Ebenfalls erstrebenswert wäre dabei die Minimierung von Installationen oder anderer Einstellungen zur Nutzung von VR und der Plattform.

Das Ziel soll eine zugängliche Plattform sein, die für unterschiedliche Nutzer ein virtuelles Modell zur Verfügung stellt, welches über VR erlebt werden kann. Eine Interaktionsmöglichkeit für den Administrator soll geschaffen werden, um die Nutzer durch die gezeigte Problemstellung zu führen und Simulationen zu manipulieren.

3.2 Konzept der VR-Plattform

Die VR-Plattform soll für zwei verschiedene Nutzergruppen zur Verfügung stehen. Die Eine entspricht dem Administrator und somit der führenden Lehrkraft. Dieser soll mit mehr Rechten und Möglichkeiten versehen durch den virtuellen Raum führen und das Modell verändern, auswählen, manipulieren und veranschaulichen können. Die Anderen sind die Teilnehmer, welche dem virtuellen Raum beiwohnen können. Diese können sich frei rotieren, um Motion-Sickness zu vermeiden und die Immersion zu gewährleisten. Die Bewegung im Raum soll allerdings vom Administrator durchgeführt werden. So kann eine gezielte Führung umgesetzt und vorausgesetzt werden. Die Teilnehmer sollen gemeinsam und gleichzeitig die Anwendung des Administrators sehen (siehe Abbildung 1).

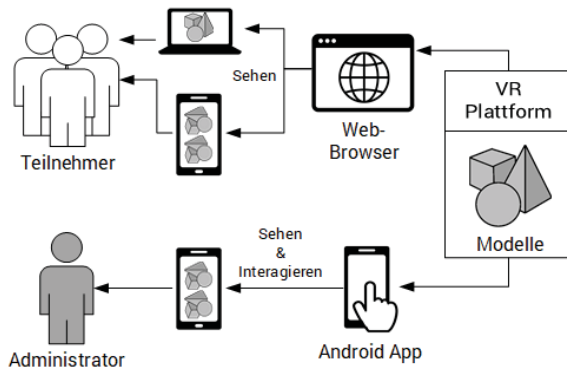


Abb. 1: Konzept zur Umsetzung der kostengünstigen VR-Plattform

Um eine einfach zugängliche Plattform ohne Installation und Einrichtung realisieren zu können, müssen vorhandene Hardwaresysteme und Softwarestrukturen verwendet werden. Die kostengünstige VR Hardware entspricht Smartphones, die bereits einen großen Anklang besitzen und aufgrund dessen einer weiten Verbreitung unterliegen.

Mit Hilfe eines Cardboards¹ können Smartphones als Head Mounted Displays (HMD) verwendet werden. Deshalb sollte die VR-Plattform mit der gängigen Smart-

phone-Technologie kompatibel und somit auf keine teuren und einrichtungsintensiven VR-HMD, wie HTC Vive² oder Oculus Rift³ angewiesen sein.

Es bietet sich somit an eine webbasierte Plattform zu schaffen, die VR-Inhalte abbilden und darstellen kann. Über alle internetfähigen Geräte, wie Laptops, Tablets und Smartphones kann somit die Plattform genutzt werden. Hierbei kommt hinzu, dass auch nicht VR-fähige Geräte wie Laptops einen Zugang zur Plattform erhalten können. Statt diese auszuschließen soll eine 3D-Ansicht gewährt werden, welche eine Teilnahme ermöglicht, aber die Immersion durch VR ausschließt.

Da zwei verschiedene Nutzergruppen umgesetzt werden sollen, muss dies über die Plattform ebenfalls unterschieden werden. Außerdem muss eine Bewegung des Administrators mit der gängigen Smartphone-Technologie realisiert werden ohne ein Tracking vorauszusetzen. Eine webbasierte VR-Plattform zur Nutzung mehrerer Personen soll für alle gängigen Smartphones umgesetzt und realisiert werden.

4 Umsetzung

4.1 Komponenten der VR-Plattform

Für die Plattform wurden zahlreiche Komponenten und Technologien entwickelt oder angebunden, um einen einfachen und flüssigen Ablauf gewährleisten zu können (siehe Abbildung 2). Grundlage der Plattform ist die VR-Plattform selbst, welche einem Linux Server entspricht auf dem die Anwendung und Szenarien gespeichert sind und ausgeführt werden. Eine Datenbank und gesichertes Login-System sollen in Zukunft entwickelt werden, sind aber im Demonstrator für dieses Paper nicht enthalten. Innerhalb der VR-Plattform befindet sich das Szenario, welches mit Unity (UNITY 2018) entwickelt wurde. Das Szenario im Demonstrator

¹ <https://vr.google.com/cardboard/>

² <https://www.vive.com/de/>

³ <https://www.oculus.com/>

entspricht einem virtuellen Hörsaal, welcher einige 3D-Modelle zur reinen Betrachtung wie ein menschliches Skelett und ein Windrad beherbergt. Ebenfalls enthalten sind interaktive Modelle wie eine Maschine mit sichtbaren sich drehenden Zahnrädern oder einem detaillierten Wandaufbau mit simulierter und animierter Temperaturverlaufskurve (siehe Abschnitt 4.2).

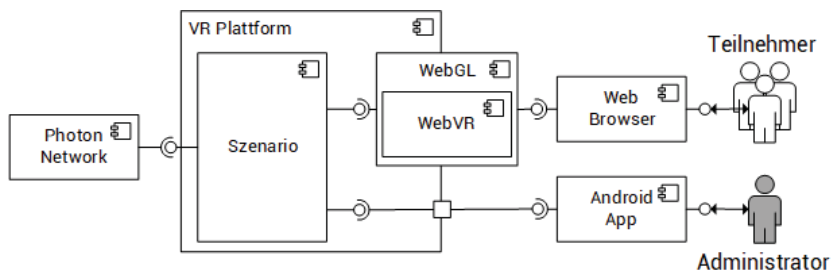


Abb. 2: Komponentendiagramm der VR-Plattform

Das Szenario ist mit einem Photon Server über die frei zugängliche Komponente Photon Network verbunden (PHOTON 2018). Das Photon Network wurde in der Unterhaltungsindustrie entwickelt und dient der Entwicklung von Multiplayer-Games. Da die gleichen Anforderungen an einen Multiplayer wie an einem hier zugrundeliegenden Multiuser getroffen wurden, bietet es sich an auf ein vorhandenes Werkzeug zurück zu greifen. Mit Hilfe von Photon Network ist es möglich Inhalte eines Szenarios von verschiedenen lokal durchgeführten Anwendungen zu spiegeln und Informationen zu synchronisieren. Jeder Teilnehmer und Administrator führt somit eine lokale Anwendung über den Web-Browser oder eine Android App durch, welche über Photon Network zu einer gemeinsamen Anwendung synchronisiert wird. Dadurch können die Informationen wie zum Beispiel über die Fortbewegung des Administrators an alle Teilnehmer weitergegeben werden und dort zu einem automatischen Positionswechsel führen oder die Interaktion mit einem Modell für alle Teilnehmer lokal gespiegelt werden. Mit Hilfe von Photon Network ist somit eine Anbindung mehrere Teilnehmer in einem virtuellen Raum möglich und umgesetzt.

Für die Entwicklung einer webbasierten Anwendung gibt es von Unity die Möglichkeit mit Hilfe der integrierten Bibliothek und JavaScript-Programmierschnittstelle Web Graphics Library (WebGL) eine HTML5 Webseite zu erstellen. Hierbei wird automatisch das abgebildete Szenario und Anwendung über Javascript für alle gängigen Web-Browser aufbereitet und nutzbar gemacht. Die Anwendung wird im Web-Browser gestartet und ausgeführt, was eine zusätzliche Installation und Einrichtung unnötig macht. Hierbei werden gleichzeitig aufwendige Anpassungsentwicklungen vermieden, da eine Anwendung nicht für spezielle Betriebssysteme wie iOS oder Android entwickelt werden muss. Somit liegt eine webbasierte Applikation, die Betriebssystem- und Versionsunabhängig ist, vor.

Um diese Inhalte nun für VR aufbereitet im Web-Browser nutzen zu können, wurde eine zusätzliche Softwarelösung namens WebVR angebunden (WEBVR 2018). WebVR ermöglicht die Übersetzung der Anwendung in eine VR-Applikation innerhalb des Web-Browsers. Es wird hierbei automatisch unterschieden, ob es sich um ein VR-fähiges Gerät wie ein

Smartphone handelt. Wenn ein VR-fähiges Gerät die Webseite aufruft wird über ein zusätzlich eingeblendetes Touch Bedienfeld die VR-Ansicht aktiviert und somit im Browser das Bild zu zwei Ansichten aufgeteilt (siehe Abbildung 3 links). Mit einem Cardboard ist die Immersion dabei am größten. Für den Fall, dass kein VR-fähiges Gerät die Anwendung startet oder die VR-Ansicht nicht aktiviert wird, wird die Anwendung in einem Bild als 3D-Anwendung ausgeführt, wodurch auch eine Teilnahme mit Laptop oder Tablet gewährleistet ist (siehe Abbildung 3 rechts). Hierbei gehen allerdings die Immersion und somit auch der gesteigerte Lerneffekt verloren.

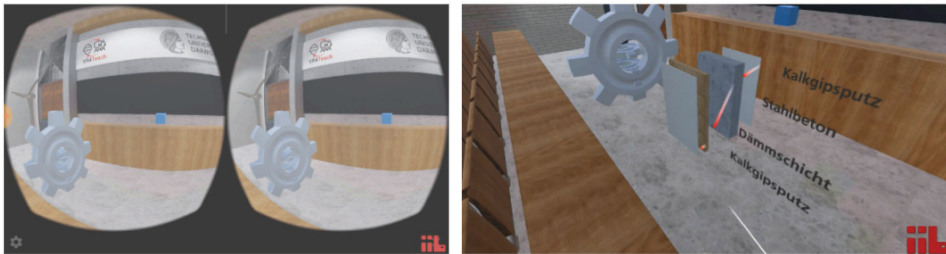


Abb. 3: Virtueller Exkursraum – VR-Ansicht und 3D-Ansicht

Neben der webbasierten Anwendung wurde die gleiche Applikation für das Android Betriebssystem Version 8.0 als App erzeugt. Grund hierfür ist die Nutzung eines Hand-Controllers als Zeige- und Interaktionsstab (siehe Abschnitt 4.2). Eine Interaktion und Bewegung ohne Tracking über zusätzliche Sensoren ist nur über das Teleportieren und Zeigen mit einem Hand-Controller möglich. Eine Kopplung des Hand-Controllers ist nur mittels des Android SDK⁴ umsetzbar und konnte auch nicht nach Recherche und mehreren Versuchen mit WebVR im Browser realisiert werden. Diese Umstände bieten allerdings die Möglichkeit für Nutzer der App mehr Rechte und Interaktionsoptionen zu schaffen. Der Unterschied im Szenario ist das Administrator Menü, welches an den Hand-Controller gebunden und somit nur in der Android App genutzt werden kann, wie im Abschnitt 4.2 beschrieben ist. Einschränkung gilt zu sagen, dass die App nur für Daydream⁵ compatible Smartphones mit allen Funktionen genutzt werden kann. Da dies aber nur für den Administrator gilt, ist diese Lösung die kostengünstigste und sinnvollste.

4.2 Visualisierungstools und Administrator Menü

Um den Mehrwert von VR zu anderen 3D-Simulationen und Modellen in Desktopanwendungen aufzuzeigen, wurden einige beispielhafte Werkzeuge zur Visualisierung, Manipulation und Interaktion implementiert. Bei Benutzung der App wird der Nutzer automatisch der Administrator des vorgestellten Szenarios und kann mit den Elementen und Modellen interagieren. Für diese Interaktionen wurde ein Menü, welches über die Benutzung des Hand-Kontrollers bedient werden kann erstellt (siehe Abbildung 4). Für einen Demonstrator wur-

⁴ <https://developer.android.com/studio/>

⁵ <https://vr.google.com/daydream/>

den folgende Interaktionsmöglichkeiten als sinnvoll und hilfreich befunden und deshalb implementiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass das Menü so gestaltet und umgesetzt ist, dass es leicht durch zusätzliche Interaktionen erweitert werden kann. Für eine kontinuierliche Übersichtlichkeit ist das Menü in einer Baumstruktur aufgebaut und die Auswahl eines bestimmten Bereiches öffnet die weiteren Unterebenen. Dadurch ist eine weite Verschachtelung möglich.

Die wesentliche Funktion ist der *Teleport*, welcher es dem Administrator ermöglicht sich im virtuellen Raum fortzubewegen ohne dies in der Realität durchführen zu müssen und somit frei von realen Grenzen zu sein. Das Besondere hierbei ist, dass über die VR-Plattform automa-

tisch alle Teilnehmer ebenfalls an diese Stelle versetzt werden und somit dem Administrator stetig folgen. Um Motion-Sickness zu vermeiden und die Immersion zu fördern ist die Rotation bei allen Teilnehmern selbstbestimmt.

Zusätzlich zum *Teleport* wurden Funktionalitäten für das *Management*, die *Visualisierung* und *Interaktion* implementiert. Das *Management* verfügt über die Funktion das Szenario zu wechseln und somit direkt innerhalb der Anwendung von einem gezeigten Modell ins nächste bzw. vorherige zu wechseln, ohne aus der Anwendung austreten oder ein erneutes Laden durchführen zu müssen. Die *Visualisie-*



Abb. 4: Interaktionsmenü des Hand-Controllers

rung beinhaltet Einstellungsmöglichkeiten der visualisierten Farbverläufe während der Laufzeit. So kann der Farbgradient verändert oder die Dicke der Linie (siehe Abbildung 3) angepasst werden.

Der Bereich *Interaktion* ist die eigentliche Interaktion mit dem Modell. Hier können Teile des Modells durch das darauf zeigen mit dem Hand-Kontroller hervorgehoben werden. Dabei werden die markierten Teile farbig umrandet oder alle umliegenden Teile transparent dargestellt. Das *Aktivieren* ermöglicht zusätzliche Skripte an einem Modell zu aktivieren und deaktivieren. Hier kann z.B. ein detaillierter Wandaufbau eingeblendet werden, wenn die Wand ausgewählt wird (siehe Abbildung 3).

Die *Explosion* ermöglicht das visuelle Aufteilen des 3D-Modells und Auftrennen in seine Einzelteile durch ein geometrisches Auseinanderschieben ähnlich einer Explosionszeichnung. Dieses hilfreiche Werkzeug ermöglicht es in komplexen Modellen einen vollumfänglichen und real nicht möglichen Einblick zu schaffen. Das *Skalieren* und *Rotieren* ist ebenfalls ein nützliches Hilfsmittel, indem das Modell gedreht oder in der Größe verändert wird und somit die Stärke von virtuellen Lehrräumen eindrucksvoll belegt.

5 Fazit und Ausblick

In einer Demonstrator-Anwendung konnte gezeigt werden, dass eine VR-Plattform für die interaktive Visualisierung von 3D-Modellen und Simulationen mit mehreren Nutzern umgesetzt und genutzt werden kann. Eine webbasierte Plattform konnte geschaffen werden, wel-

che es ermöglicht die VR-Anwendung zu nutzen unabhängig des Betriebssystems und Version des Gerätes. Die webbasierte Entwicklung ermöglicht die Nutzung von High-End Geräten wie HTC Vive, Oculus Rift aber auch kostengünstige und alltägliche Geräte wie Smartphones. Zusätzlich wurde hierbei eine Möglichkeit gefunden die Teilnahme auch für Geräte ohne VR-Technologie zu gewährleisten. Mit Hilfe einiger beispielhafter Interaktionsmöglichkeiten für den Administrator in einer angebunden Android App konnten die Stärken der VR-Technologie für Lehre und zur Verständnissteigerung demonstriert und mit der webbasierten Plattform gekoppelt werden. Eine kostengünstige Lösung mit geringen Einrichtungsaufwand für die Steigerung des Lerneffekts wurde somit für verschiedene Fachbereiche und Sachverhalte geschaffen.

Nachdem die sinnvolle Kombination verschiedener Technologien eine kostengünstige VR-Plattform ermöglicht hat, wäre der nächste Schritt diese mit einem automatischen Aufbereitungsprozess für 3D-Modelle zu erweitern und dies im Lehrbetrieb zu validieren. Anschließend wäre es möglich beliebige 3D-Modelldaten aus unterschiedlichen Datenformaten hochzuladen und diese selbständig durch die Plattform validieren und für die Anwendung aufbereiten zu lassen. Es könnte somit ein Weg geschaffen, nicht nur die Anwendung der Plattform benutzerfreundlich und einfach umzusetzen, sondern auch die Einrichtung der Modelle für beliebige Fachkreise mit unterschiedlichen technologischen Wissenstand zu öffnen und anwendbar zu gestalten.

Literatur

- AI-LIM LEE, E., WONG, K. W. & FUNG, C. C. (2010). How does desktop virtual reality enhance learning outcomes? A structural equation modeling approach. *Computers & Education*, 55(4), 1424–1442. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.06.006>
- DÁVIDEKOVÁ, M., MJARTAN, M. & GREGUŠ, M. (2017). Utilization of Virtual Reality in Education of Employees in Slovakia. *Procedia Computer Science*, 113, 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.365>
- GOOGLE. (2017, January 2). Google Expeditions. Retrieved 24 May 2018, from <https://www.google.com/expeditions/>
- KOCKRO, R. A., AMAXOPOULOU, C., KILLEEN, T., WAGNER, W., REISCH, R., SCHWANDT, E., ... STADIE, A. T. (2015). Stereoscopic neuroanatomy lectures using a three-dimensional virtual reality environment. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, 201, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2015.05.006>
- MEUNIER, L., KELLER, D. & GUÉDON, P. (2018). Virtual Reality: Lessons learned from WEST design and perspectives for nuclear environment. *Fusion Engineering and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.05.004>
- PHOTON. (2018). Multiplayer Game Development Made Easy | Photon Engine. Retrieved 30 May 2018, from <https://www.photonengine.com/>
- SAMPAIO, A. Z., FERREIRA, M. M., ROSÁRIO, D. P. & MARTINS, O. P. (2010). 3D and VR models in Civil Engineering education: Construction, rehabilitation and maintenance. *Automation in Construction*, 19(7), 819–828. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.05.006>
- UNITY. (2018). Unity. Retrieved 30 May 2018, from <https://unity3d.com>
- WEBVR. (2018). WebVR - Bringing Virtual Reality to the Web. Retrieved 30 May 2018, from <https://webvr.info/>

Session 8:

Visualisierung 2 / Verkehrssimulation

Automatische Generierung von Baummodellen

Fabian Meister

Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen · Technische Universität Braunschweig · Pockelsstraße 3 · 38106 Braunschweig
E-Mail: f.meister@tu-bs.de

Feinstaubbelastungen in Großstädten erreichen weltweit ein gesundheitskritisches Niveau. Eine Möglichkeit diese Belastungen zu untersuchen und Gegenmaßnahmen zu entwickeln, bieten Computersimulationen. Die Einschätzung von Feinstaubbelastungen, durch die Simulation von Luftströmungen innerhalb einer urbanen Umgebung, ist ein Ziel der heutigen Forschung. Die Durchströmung einer solchen urbanen Umgebung wird hierbei maßgeblich von Gebäuden und Bäumen beeinflusst. Die Gebäudegeometrie ist häufig bekannt. Hingegen ist die Berücksichtigung von Bäumen aufgrund ihrer hohen Anzahl und Vielfalt eine große Herausforderung. Ein Ansatz ist die programmatische und automatisierte Erzeugung von Baumstrukturen.

Eine Erzeugung von Baumstrukturen ist aktuell durch verschiedene Programmsysteme realisiert. Die erzeugten Baumstrukturen solcher Systeme sind hierbei allerdings nicht auf ihr natürliches Durchströmungsverhalten validiert worden.

Im Folgenden wird eine Berechnungsmethodik zur Generierung von Baumstrukturen auf Grundlage eines vorher definierten Parametersatz vorgestellt. Ziel ist die automatisierte Generierung einer Vielzahl verschiedener Baumstrukturen, welche sich adaptiv in eine gegebene Umgebung einpassen.

Keywords: Baumgenerierung, Baummodelle, Simulation, Modellierung

1 Einleitung

Die händische Erzeugung einer großen Vielfalt verschiedener Baummodelle ist sehr zeitaufwändig. Die Computer gestützte Generierung solcher Baummodelle stellt eine effiziente Alternative dar. Hierbei ist die Generierung von realitätsnahen Baumstrukturen in einer angemessen kurzen Zeit nicht trivial. In den folgenden Abschnitten wird eine Methode zur automatisierten Generierung von Baummodellen vorgestellt. Diese Implementierung soll die Möglichkeit schaffen eine große Anzahl verschiedener Baumstrukturen zu erzeugen. Hierbei soll eine biologisch plausibel und höchst detaillierte Baumstruktur generiert werden können. Die Erzeugung einer solchen Baumstruktur mit den genannten Eigenschaften soll in kurzer Zeit möglich sein.

2 Stand der Technik

Für die Erzeugung von virtuellen Baummodellen gibt es verschiedene Ansätze. Einer der ersten Ansätze ist von A. Lindenmayer (LINDENMAYER et al. 1996). Lindenmayer führte das sogenannte Lindenmayer-System ein. Dieses System versucht Bäume- und Pflanzenstrukturen als wiederholende, selbstähnliche Strukturen zu beschreiben (PRZEMYSŁAW 1989). Jede Struktur wird hierbei durch eine Ausgangsstruktur und Änderungsregeln unterschieden (LINDENMAYER et al. 1996). In jedem Berechnungsschritt wird dann die Baumstruktur durch das Anwenden der Änderungsregeln verfeinert. Dieses Verfahren ist eine Abwandlung der sogenannten formalen Grammatiken (ILLIK 2009).

Modernere Baumgenerierungsmodelle betrachten häufig Umwelteinflüsse als maßgeblichen Faktor der Entwicklung einer Baumstruktur. Der space colonization-Algorithmus ist ein Beispiel für ein solches Modell. Im space colonization-Algorithmus wird der Wettbewerb um den vorhandenen Raum als maßgeblicher Faktor der Strukturentwicklung betrachtet (RUNIONS et al. 2007, LONGAY et al. 2012). Der Ansatz einer selbstähnlichen Struktur wird hierbei vollkommen verworfen. Ein ähnlicher Ansatz wird im self-organizing tree Modell gewählt. Dieses Modell beschreibt die Ausbildung einer Baumstruktur als Wettbewerb der Äste um verfügbare Ressourcen (KOHEK et al. 2015). Im self-organizing tree Modell wird die Lichtintensität im Raum als maßgebliche Ressource betrachtet. Die Wasser- und Nährstoffversorgung der Bäume wird als ausreichend betrachtet und nicht weiter berücksichtigt.

3 Aufbau eines Baumgenerators

Das hier vorgestellte Modell ist eine Erweiterung des self-organizing tree Modells. Die Generierung erfolgt hierbei in zwei Teilschritten. Im ersten Schritt wird ein Mittellinienmodell der Struktur erzeugt. Ein solches Modell ist für eine begrenzte Anzahl an Berechnungsschritten gültig. Üblich ist die Beschreibung der Mittellinien durch Knoten und Kanten. Knoten befinden sich an festen Positionen im Raum und werden durch Kanten miteinander verbunden. Erst im zweiten Schritt wird aus dem Mittellinienmodell eine Volumen-geometrie erzeugt. Im Folgenden wird nur auf die Methoden zur Generierung eines Mittellinienmodells eingegangen.

3.1 Aufbau der Baumstruktur

Das hier vorgestellte Modell verwendet ein Mittellinienmodell zur Beschreibung von Baumstrukturen. Jede Baumstruktur ist hierbei aus einzelnen Ästen zusammengesetzt. Ein Ast besteht aus Knoten und Kanten. Ein Ast beginnt an einem Knoten. Dieser erste Knoten wird als Basisknoten bezeichnet. Die Anzahl der Knoten $N_{n,a}$ eines Astes a liegt hierbei zwischen $1 \leq N_{n,a} \leq \infty$. Die Knoten eines Astes sind eindimensional über Kanten verbunden. Somit ist die Richtung eines Astes eindeutig gegeben, wenn der Basisknoten als Beginn definiert wird. In einer Baumstruktur sind Äste miteinander verbunden. Daher ist jeder Knoten eines Astes a_i der Basisknoten eines neuen Astes a_k . Eine solche Verkettung der Äste a_i und a_k ermöglicht den Aufbau einer Hierarchie. Hierbei gilt für die Hierarchie-Stufe H_k des Astes a_k : $H_k = H_i + 1$. Für den ersten Ast einer Baumstruktur gilt $H_1 = 1$. In dem Modell werden alle Informationen der Baumstruktur in Knoten hinterlegt. In einem Knoten sind die Positionierung im Raum und modellspezifische Eigenschaften enthalten.

3.2 Lichtmodell

In diesem Abschnitt wird das verwendete Lichtmodell näher erläutert. Die Anwendungen eines Lichtmodells werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

Das sogenannte Shadow-propagation model (SPM) wird zur Bestimmung der Beleuchtungsintensität in einem Volumen verwendet (PALUBICKI et al. 2012). Das SPM ist eine gitterbasierte Methode. In einem ersten Schritt wird das betrachtete Volumen in Teilvervolumen $V(i,j,k)$ unterteilt. Jedes dieser Teilvervolumen repräsentiert einen Kubus mit einer festen Kantenlänge.

Für jedes dieser Teilvolumen kann die Lichtintensität I_v bestimmt werden. Hierbei ist I_v im Intervall $0 \leq I_v \leq 1$ bestimmt. Eine Belichtungsintensität von $I_v = 0$ entspricht einem vollständig ausgeleuchteten Teilvolumen. Entsprechend repräsentiert eine Intensität $I_v = 1$ absolute Dunkelheit. Zu Beginn wird jedes Teilvolumen mit $I_v = 0$, also vollständig beleuchtet, initialisiert. In einem weiteren Schritt werden die Schatten aller modellrelevanten Objekte eingetragen.

Im SPM werfen nur die Knoten einer Baumstruktur Schatten. Um den Schattenwurf eines Knotens zu bestimmen, wird zunächst das Teilvolumen $V(i,j,k)$ gesucht, in welchem der Knoten liegt. Eine neue Lichtintensität wird dann für alle anderen Teilvolumen $V(x,y,z)$ berechnet, für die die Gleichungen (1) bis (4) gelten:

$$i - z \leq x \leq i + z \quad (1)$$

$$j < z \leq z_{max} \quad (2)$$

$$k - z < y \leq k + z \quad (3)$$

$$\text{mit } z_{max} \geq 1 \quad (4)$$

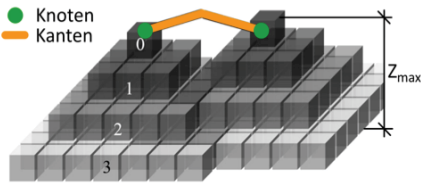


Abb. 1:

Darstellung des pyramidalen Schattenwurfs unter Knoten nach (PALUBICKI et al. 2012).

Diese Bedingungen beschreiben einen pyramidalen Schattenwurf unterhalb des Knotens. Die Tiefe des Schattenwurfs ist durch z_{max} definiert. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt. Ist ein Teilvolumen von einem Schattenwurf betroffen, wird dafür eine neue Lichtintensität $I_{v,neu}$ bestimmt. Dabei wird die bisherige Lichtintensität $I_{v,alt}$ berücksichtigt (KOHEK et al. 2015). Dieser Zusammenhang ist in den Gleichungen (5) und (6) dargestellt.

$$I_{v,neu} = \min \begin{cases} I_{v,alt} + \Delta I_v \\ 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{mit } \Delta I_v = \frac{a}{b^z}, a, b \in R, a > 0, b > 1 \quad (6)$$

a und b sind frei wählbare Modellparameter.

3.3 Ressourcenverteilungsmodell

Die hier vorgestellte Methode verwendet ein Ressourcenverteilungsmodell um das Wachstum der Struktur zu berechnen. In einem ersten Schritt werden die verfügbaren Ressourcen R bestimmt. Hierfür werden nacheinander alle Strukturknoten n betrachtet und entschieden, ob ein Knoten ein Blatt ausbildet. Für diese Unterscheidung wird die Knotenbelichtungsintensität I_n einem Schwellenwert t_{blatt} gegenübergestellt. Gilt: $I_n > t_{blatt}$, bildet der Strukturknoten ein Blatt aus. Im Anschluss werden die Belichtungsintensitäten aller Knoten mit einem Blatt zu einer Gesamtlichtintensität I_{baum} summiert. Die Menge verfügbarer Ressourcen R ist die skalierte Menge der Intensität I_{baum} . In den Gleichungen (7) und (8) wird dieser Zusammenhang dargestellt (KOHEK et al. 2015).

$$I_{baum} = \sum_n I_n, I_n > t_{blatt} \quad (7)$$

$$R = s \cdot I_{baum} \quad (8)$$

Als Skalierungsfaktor s kann ein beliebiger Wert $s > 0$ verwendet werden. Dieser ist in Abhängigkeit vom Lichtmodell zu wählen. Üblich ist ein Faktor $s = 3$. Verfügbare Ressourcen werden an alle Äste der Baumstruktur verteilt. Für den Verteilungsmechanismus ist jeder Ast in der Lage, auf eingehende Ressourcen zu reagieren. Ressourcen R_{ein} die in einen Ast eingehen, werden an alle mit diesem Ast verbundenen Äste weiter verteilt. Hierbei verbleibt ein Teil der Ressourcen $R_{a,0}$ im verteilenden Ast. Die Menge der Ressourcen $R_{a,i}$ pro Ast a_i , ist die gewichtete Summe zweier Teile $R_{a,i,1}$ und $R_{a,i,2}$. Dies wird in Gleichung (9) gezeigt.

$$R_{a,i} = \rho \cdot R_{a,i,1} + (1 - \rho) \cdot R_{a,i,2} \quad \text{mit } \rho \in \mathbb{R}, 0 \leq \rho \leq 1 \quad (9)$$

$R_{a,i,1}$ entspricht der Ressourcenmenge welche jedem Ast bei gleichmäßiger Verteilung zugesprochen würde. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung (10) dargestellt.

$$R_{a,i,1} = \frac{R_{ein}}{\text{Anzahl verbundener Äste} + 1} \quad (10)$$

Hierbei wird der Eigenanteil $R_{a,0}$ des verteilenden Astes berücksichtigt.

Der zweite Teil $R_{a,i,2}$ gewichtet die Ressourcenverteilung entsprechend der Belichtungsintensität verbundener Äste I_a . Die Belichtungsintensität eines Astes $I_{a,i}$, entspricht hierbei der Summe der Lichtintensitäten aller verbundenen Äste $I_{a,j}$ und Knoten $I_{n,j}$. Somit gilt Gleichung (11).

$$I_{a,i} = \sum_{j=0} I_{n,j} + I_{a,j} \quad (11)$$

Um für den verteilenden Ast a_0 eine sinnvolle Verteilung zu erzielen, ist eine alternative Berechnungsmethode notwendig. Für diesen Fall entspricht die Lichtintensität $I_{a,0}$ der Intensität des letzten Basisknotens der Astreihe $I_{a,last}$. Der Fall ist in Gleichung (12) dargestellt.

$$I_{a,0} = I_{a,last} \quad (12)$$

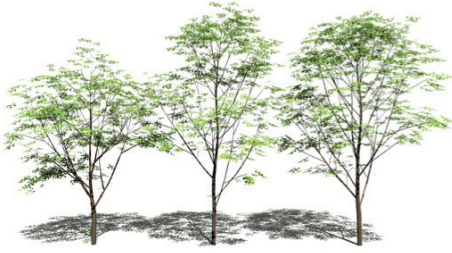
Durch Einführung der genannten Berechnungsvorschriften, lässt sich der Teil $R_{a,i,2}$ wie folgt schreiben:

$$R_{a,i,2} = R_{ein} \cdot \frac{\sum_{k=0} \omega_{a,k}(I_{a,k}) \cdot I_{a,k}}{\omega_{a,i}(I_{a,i}) \cdot I_{a,i}} \quad (13)$$

Der veränderliche Parameter $\omega_{a,i}(I_{a,i})$ entspricht hierbei einer astspezifischen Gewichtung. Das Gewicht lässt sich als Funktion (14) der jeweiligen Astlichtintensitäten schreiben:

$$\omega_{a,i}(I_{a,i}) = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{\lambda}{\lambda + (1 - \lambda) \cdot \left(\frac{I_{a,i}}{30 \cdot \lambda}\right)^3} \quad \text{mit } \lambda \in \mathbb{R} : 0 < \lambda < 1 \quad (14)$$

Der Parameter λ ist für jede Baumstruktur spezifisch zu wählen. In Abbildung 2 sind Resultate verschiedener Einstellungen dargestellt. Die hier verwendete Gewichtungsfunktion ist eine angepasste Variante der Verteilungsfunktion des extended Borchert-Honda Modells BORCHERT et al. (1984), welches im self-organizing tree Modell verwendet wird.

**Abb. 2:**

Ausbildung der Baumstruktur mit verschiedenen Ressourcenverteilungen.

Links: großes λ

Mitte: kleines λ und großes ρ

Rechts: kleines ρ

Das bisher vorgestellte Ressourcenverteilungsmodell vernachlässigt Einflüsse aus Apikaldominanz. Unterdrückt ein Ast das Wachstum der mit diesem Ast verbundenen Äste, wird dies als Apikaldominanz bezeichnet (NITSCHKE 2006). Diese Dominanz ist bei jeder Baumstruktur unterschiedlich ausgeprägt und vom Alter der Baumstruktur abhängig (NITSCHKE 2006). In dem hier vorgestellten Modell wird die Apikaldominanz durch die Modifikation des Gewichtungsfaktors $\omega_{a,0}$ berücksichtigt. Hierfür wird zu dem Faktor $\omega_{a,0}$ ein zusätzlicher Term summiert. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung (15) dargestellt.

$$\omega_{a,0} = \omega_{a,0}(I_{a,0}) + \frac{\mu}{N_{age} + 1} \text{ mit } \mu \in R^+ \quad (15)$$

N_{age} entspricht der Anzahl bereits durchlaufender Berechnungsschritte. Der Faktor μ ist im R^+ frei wählbar. Üblich ist eine Wahl im Bereich $0 \leq \mu \leq 2$. Der Eigenanteil $R_{a,0}$ eines Astes wird für dessen Erweiterung um weitere Basisknoten genutzt. Hierfür wird die Anzahl N_{neu} der neuen Knoten n wie in Gleichung (16) bestimmt (PALUBICKI et al. 2004).

$$N_{neu} = \lfloor R_{a,0} \rfloor \quad (16)$$

Die Kantenlänge L_k neu erstellter Kanten wird nach Gleichung (17) bestimmt.

$$L_k = \frac{R_{a,0}}{N_{neu}} \quad (17)$$

3.4 Wuchsrichtung neuer Äste

Für die Erweiterung eines Astes a_i um neue Knoten, ist neben der Anzahl N_{neu} die Wachstumsrichtung \vec{w} relevant. Die Wachstumsrichtung \vec{w} wird hierbei als relative normierte Richtung vom letzten Knoten n_{last} des Astes a_i angegeben. Ein neuer Knoten wird dann an der Position $\vec{p}_n = \vec{p}_{last} + L_k \cdot \vec{w}$ erzeugt und über eine Kante k mit dem Knoten n_{last} verbunden. Der neu erzeugte Knoten wird im Anschluss als n_{last} bezeichnet. Die Wachstumsrichtung \vec{w} wird als Überlagerung verschiedener Teilrichtungen \vec{w}_j berechnet (PALUBICKI et al. 2004, RUNIONS et al. 2007). Hierbei können verschiedene Teilrichtungen angesetzt werden. Es werden folgende Einflüsse berücksichtigt:

1. Bisherige Wachstumsrichtung \vec{w}_{cur}
2. Optimale Belichtungsrichtung \vec{w}_{opt}
3. Gravitropismus \vec{w}_{trop}

4. Zufall \bar{w}_{rand}

5. Astgewicht \bar{w}_g

Die Berechnung der Wachstumsrichtung \bar{w} erfolgt dann wie in Gleichung (18) angegeben.

$$\bar{w} = \left\| \sum_j \eta_j \cdot \bar{w}_j \right\| \quad (18)$$

Hierbei ist η_j ein für jede Teilrichtung \bar{w}_j wählbarer Gewichtungsfaktor für den gilt: $\eta_j \in \mathbb{R}$.

Die Ausbildung von Strukturen mit verschiedenen Gewichtungen ist in Abbildung 3 dargestellt.



Abb. 3:

Ausbildung der Baumstruktur mit verschiedenen Richtungsgewichten.

Links: großes η_{rand}

Mitte: ausgewogene Gewichtungen

Rechts: großes η_{opt}

Die bisherige Wachstumsrichtung \bar{w}_{cur} ist hierbei als normierter Kantenvektor \bar{k} der beiden vorherigen Knoten n_{last} und n_{last-1} definiert: $\bar{k} = \|n_{last} - n_{last-1}\|$. Für den zweiten Knoten eines Astes ist diese Definition von \bar{w}_{cur} nicht möglich. Somit ist eine Vordefinition einer „bisherigen Wachstumsrichtung“ \bar{w}_{cur} sinnvoll. Für die Vordefinition wird Phyllotaxis verwendet. Phyllotaxis beschreibt die regelmäßige Anordnung von Blättern spiralförmig um einen Ast (ADLER 1974, REINHARDT 2003). Hier wird davon ausgegangen, dass Blätter und Äste in die gleiche Richtung zeigen. Die Anordnung durch Phyllotaxis kann durch zwei Winkel beschrieben werden. Der Winkel ϕ repräsentiert den Winkel zwischen zwei aufeinanderfolgender Äste a_i und a_{i+1} um eine Achse \bar{a} . Der Winkel zwischen der Achse \bar{a} und einem Ast a_i wird als α bezeichnet. Üblich ist eine Wahl der Winkel von $\phi = 138^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$.

3.5 Absterben von Ästen

Jeder Ast in der Baumstruktur konsumiert und erzeugt Ressourcen für das Gesamtsystem. Somit ist eine Optimierung der Bilanz aus Konsum und Erzeugnis für das Gesamtsystem vorteilhaft. Eine Möglichkeit der Optimierung bietet die Eliminierung von ineffizienten Ästen. Sollte die durchschnittliche Belichtungsintensität $\emptyset I_{a,i}$ eines Astes unterhalb eines Schwellenwerts t_{shed} fallen, gilt dieser Ast a_i als ineffizient (KOHEK 2015).

Hierbei kann die durchschnittliche Belichtungsintensität wie in Gleichung (19) folgt berechnet werden:

$$\emptyset I_{a,i} = \frac{\sum_{i=0}^{N_{n,ges,a,i}} I_{n,a,i}}{N_{n,ges,a,i}} \quad (19)$$

3.6 Anpassen von Schwellenwerten

Im vorgestellten Modell werden zwei Schwellenwerte t_{shed} und t_{blatt} verwendet. Im self-organizing tree Modell werden diese Schwellenwerte vor der Baumgenerierung gewählt (PALUBICKI et al. 2012). Diese Wahl kann bei variierenden Belichtungssituationen zu ungewollten Auswirkungen führen. Deshalb wird im Folgenden für die verwendeten Schwellenwerte je eine funktionale Darstellung gewählt. Das Wachstum eines Blattes wird durch den Schwellenwert t_{blatt} bestimmt. Hierbei sollen Blätter nur an ausreichend belichteten Knoten der Baumstruktur entstehen. Als Maß für die Beleuchtungssituation einer Baumstruktur wird die durchschnittliche Belichtungsintensität aller Knoten $\emptyset I_{n,ges}$ angenommen. Diese kann durch Gleichung (20) bestimmt werden.

$$\emptyset I_{n,ges} = \frac{\sum_{i=0}^{N_{n,ges}} I_i}{N_{n,ges}} \quad (20)$$

Auf Grundlage dieser Annahme kann der Schwellenwert t_{blatt} wie in Gleichung (21) geschrieben werden.

$$t_{blatt} = \varepsilon \cdot \emptyset I_{n,ges} \quad \text{mit } \varepsilon \in R^+ \setminus \{0\} \quad (21)$$

Für ε_{blatt} wird ein Wert von $\varepsilon_{blatt} = 1,2$ gewählt. Der zweite verwendete Schwellenwert t_{shed} ist ein Maß für das Eliminieren von Ästen. Auch durch diesen Schwellenwert können Artefakte aus variierenden Belichtungssituationen entstehen. Deshalb wird für t_{shed} ein zu t_{blatt} analoger Ansatz gewählt. Lediglich der Faktor ε wird zu $\varepsilon_{shed} = 0,5$ angepasst.

4 Resultate

Das hier beschriebene Modell wurde in Java implementiert und getestet. Die Berechnungen wurden auf einem Intel Core i7-7500U mit 2,7 GHz durchgeführt. Es wurde ein Kern verwendet. Alle Darstellungen wurden mit texturierten Geometrien in Blender erzeugt. In der folgenden Abbildung 4 ist die Entwicklung einer Baumstruktur dargestellt.



Abb. 4:
Baumstruktur in verschiedenen Iterationsschritten N_i .
Von links:
 $N_i=5, N_i=10, N_i=15, N_i=20, N_i=25$

Tabelle 1: Rechenzeit der in Abbildung 4 dargestellten Baumstrukturen.

Anzahl Iterationsschritte N_i	5	10	15	20	25
Gesamte Berechnungsdauer	0,2s	0,3s	0,8s	1,8s	3,8s
Anzahl Strukturknoten	30	119	576	2073	6491

Das vorgestellte Modell ist in der Lage Interaktionen zwischen Baummodellen und anderen Geometrien zu realisieren. Ein Beispiel einer solchen Interaktion ist in Abbildung 5 dargestellt. Alle drei dargestellten Baummodelle sind mit den gleichen Parametern erzeugt worden.

**Abb. 5:**

Interaktion von Baumstrukturen

Links: Strukturausbildung ohne Interaktion,

Berechnungsdauer: 1,3s

Rechts: Zwei Strukturen interagieren,

Berechnungsdauer: 2,6s

5 Zusammenfassung

Es wurde eine Methode zur Generierung von Baummodellen vorgestellt, welche Einflüsse aus Licht, Ressourcenverteilungen, Wachstumsrichtungen und Verzweigungsmustern vereint. Die vorgestellte Methode ermöglicht die Generierung einer Vielzahl verschiedener Baumstrukturen auf Grundlage eines relativ kleinen Parametersatzes. Hierbei wird die Interaktion zwischen mehreren Bäumen oder zwischen Bäumen und externen Geometrien modelliert. Der Algorithmus ist ausreichend robust, um eine große Anzahl verschiedener Parametereinstellungen zu realisieren. Trotzdem konnte eine kurze Generierungsdauer erreicht werden.

Literatur

- ADLER, I. (1974), A model of contact pressure in phyllotaxis.
- BORCHERT, R. & HONDA, H. (1984), Control of Development in the Bifurcating Branch System of *Tabebuia rosea*: A Computer Simulation.
- ILLIK, J. (2009), Formale Methoden der Informatik: von der Automatentheorie zu Algorithmen und Datenstrukturen.
- KOHEK, S. & STRNAD, D. (2015), Interactive synthesis of self-organizing tree models on the GPU.
- LONGAY, S., RUNIONS, A., BOUDON, F. & PRUSINKIEWICZ, P. (2012), TreeSketch: Interactive Procedural Modeling of Trees on a Tablet.
- NITSCHKE, E. (2006), Nutzung phyto-bakterieller Gene zur Beeinflussung der pflanzlichen Apikaldominanz – Untersuchungen in transienten und induzierbaren transgenen Expressionssystemen.
- PALUBICKI, W., HOREL, K., LONGAY, S., RUNIONS, A., LANE, B., MĚCH, R., PRUSINKIEWICZ, P. (2009), Selforganizing Tree Models for Image Synthesis.
- PRUSINKIEWICZ, P. & LINDENMAYER, A. (1996), The Algorithmic Beauty of Plants.
- PRZEMYSŁAW PRUSINKIEWICZ, J. H. (1989), Lecture Notes in Biomathematics.
- REINHARDT, D., PESCE, E.-R., STIEGER, P. A., MANDEL, T., BALTENSPERGER, K., BENNETT, M. J., TRAAS, J., FRIML, J. & KUHLEMEIER, C. (2003), Regulation of phyllotaxis by polar auxin transport.
- RUNIONS, A., LANE, B. & PRUSINKIEWICZ, P. (2007), Modeling Trees with a Space Colonization Algorithm.

Implementierung einer durchgängigen, redundanzfreien Informationsaustauschmethodik mittels BCF-Dateien in ein CAD-Programm

Lisa-Marie Krenz

Schüßler-Plan Ingenieurgesellschaft mbH/ Technische Hochschule Köln
Sankt-Franziskus-Straße 148 · 40470 Düsseldorf
E-Mail: lmkrenz@schuessler-plan.de

Das BCF-Format ist ein wichtiges Format für den Informationsaustausch zwischen mehreren Planungsbeteiligten und darf in keinem BIM-fähigen Programm fehlen. Durch BCF-Dateien können Probleme, die während der Planung von Bauwerken auftreten, einfacher an andere Planer verteilt und Verbesserungsvorschläge gemacht werden. Das Anzeigen des Problems direkt am Modell ermöglicht auch bei umfangreichen Projekten eine direkte Erkennung des Problems; der Planer muss nicht erst die Problemstelle im Modell suchen.

Um eine solche Informationsaustauschmethodik nutzen zu können, muss diese, wenn noch nicht vorhanden, zuerst im CAD-Programm implementiert werden. Der Beitrag richtet sich an Bauinformatiker, die ebenfalls eine Schnittstelle für BCF-Dateien in einem Konstruktionsprogramm implementieren möchten.

Keywords: BIM, Schnittstellenentwicklung, BCF, Interoperabilität

1 Einführung

Die Building Information Modeling Methodik behandelt die durchgängige Nutzung aller Bauwerksdaten über den gesamten Lebenszyklus, angefangen bei dem Neubau bzw. Umbau, über die Erhaltung bis hin zum Abriss, eines Bauwerks. Dabei spielt BIM besonders in der Planungsphase des Neu- oder Umbaus eines Bauwerks eine wichtige Rolle. Durch das Arbeiten mit der BIM-Methodik kann die Planung und Herstellung eines Bauwerks effizienter und redundanzfreier als mit dem konventionellen Verfahren durchgeführt werden. Die Implementierung einer Informationsaustauschmethodik in einem CAD-Programm kann die Effizienz in der Planungsphase ebenfalls steigern und die modellbasierte Interoperabilität ermöglichen.

Dadurch, dass innerhalb des Planungsprozesses eines Bauwerks sehr viele verschiedene Planungsbeteiligte zusammenarbeiten und sich abstimmen müssen, ist ein ständiger Informationsaustausch erforderlich. Der Austausch soll dazu dienen, Inkonsistenzen zwischen verschiedenen Fachplanungen zu vermeiden. Erschwerend kommt hinzu, dass die unterschiedlichen Fachplaner mit verschiedenen Planungsprogrammen arbeiten.

Im Gegensatz zu der konventionellen Methode, wo Planausschnitte mit Unstimmigkeiten per Mail an einen anderen Fachplaner verschickt werden, wird in der BIM-Methodik mit BCF-Dateien gearbeitet. Das BIM Collaboration Format, kurz BCF, ist ein standardisiertes Datenformat, welches entwickelt wurde, um über BIM-Modelle und zwischen BIM-fähiger Software zu kommunizieren. Es dient also dem Informationsaustausch zwischen den Planungsbeteiligten über das BIM-Modell. Besonders an dem Austauschformat ist, dass es

nicht der Modellübergabe selbst dient, sondern nur verwendet wird, um Informationen über das Modell bzw. die Unstimmigkeiten im Modell auszutauschen. Mit der Speicherung an einem festgelegten Ort aller BCF-Dateien in einem Projektordner oder Projektplattform ist auch im Nachhinein nachvollziehbar, welche Fehler wann und bei wem aufgetreten sind und wie diese gelöst bzw. weiterverarbeitet werden.

Es ist wichtig, dass das BCF-Format in CAD-Programme integriert wird, weil das Format zum einen ein standardisiertes Format ist, welches von vielen anderen Programmen gelesen werden kann und weil zum anderen die Probleme an einem Modell direkt versendet bzw. erkannt werden können.

Um eine Informationsaustauschmethodik für BCF-Dateien in einem CAD-Programm zu implementieren, ist es wichtig zu wissen, welche Daten eine BCF-Datei enthält und in welcher Form diese gespeichert werden. Daher wird im Abschnitt 3 bzw. 4 des Beitrages beschrieben, wie eine BCF-Datei aufgebaut ist und welche Anforderungen sich daraus für die Implementierung ergeben. Im Abschnitt 5 wird schließlich die Umsetzung des implementierten Tools, der sogenannten *bcfVerwaltung*, erläutert.

Im Folgenden wird ein Anwendungsbeispiel gegeben, um eine bessere Vorstellung von einer BCF-Datei zu bekommen.

2 Anwendung der BCF-Datei

Die Erläuterung der Anwendung einer BCF-Datei erfolgt anhand des beschriebenen Beispiels: Zur Erstellung einer Flügelwand einer Fußgängerunterführung, muss zuerst eine Trägerbohlwand als Baugrubensicherung erstellt werden. Diese muss mithilfe von Verpressankern rückverankert werden. Da es beim Bohren der Löcher für die Verpressanker leicht zu Ungenauigkeiten kommen kann, werden um die eigentlichen Verpressanker Toleranzkörper mit einem größeren Durchmesser geplant. Das Problem liegt darin, dass sich die Toleranzkörper überschneiden (vgl. Abbildung 1)

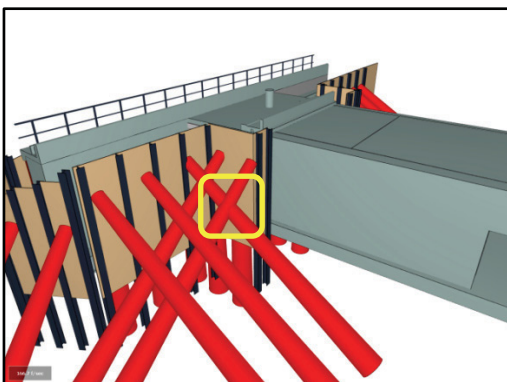


Abb. 1:
Problem in der Planung:
Verpressanker überschneiden sich

Um nun diesen Fehler dem Planer für die Baugrubensicherung mitzuteilen, kann im Modellbereich des CAD-Programms eine BCF-Datei erstellt werden. Diese enthält dann, wie in Abbildung 2 zu sehen, einen Kommentar, dass sich die Anker überschneiden und einen

Screenshot des Problems. Weiterhin sind intern hinterlegt, von welcher Richtung und welchem Standpunkt aus das Modell betrachtet wird. So kann der Planer für die Baugrubensicherung die Datei in sein Konstruktionsprogramm importieren und sich die Stelle, wo das Problem auftritt, direkt anzeigen lassen. Die Bauteile, welche in dem Problem betroffen sind, können ebenfalls intern gespeichert und angezeigt werden.

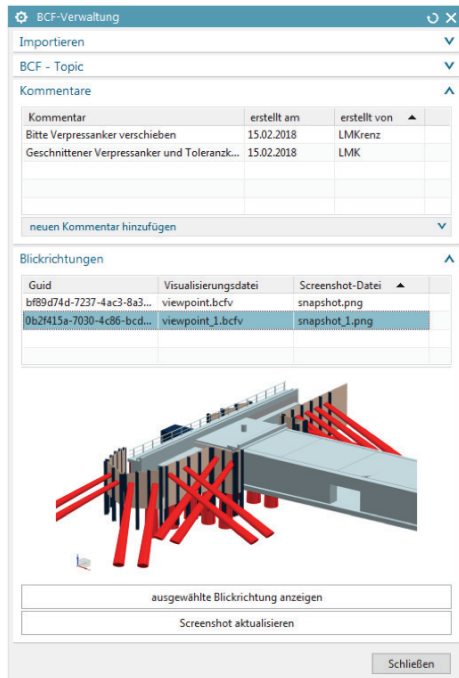


Abb. 2:
BCF-Datei im Konstruktionsprogramm mit
Kommentar und
Screenshot

Die technische Zusammensetzung der BCF-Datei bzw. wie die Daten abgespeichert werden, wird im nächsten Abschnitt genauer erläutert.

3 Aufbau der BCF-Datei

Technisch gesehen ist eine BCF-Datei eine Zip-Datei, welche in der aktuellen Version 2.1 mit der Dateiendung *.bcf* endet. Für jede Zip-Datei gibt es eine *Guid* (Globally Unique ID), die als Name für die Zip-Datei benutzt werden kann. In jeder BCF-Datei können mehrere Probleme, von den Entwicklern *topic* genannt, enthalten sein. Ein Problem wiederum kann mehrere Kommentare und Blickpunkte enthalten.

Das BCF-Format wurde in Verbindung mit dem IFC-Format entwickelt. Somit ist gewährleistet, dass der Empfänger der BCF-Datei auch ein Modell zu den Mängelinformationen erhält. Es ist allerdings auch möglich eine BCF-Datei zu erstellen und auszuwerten, ohne dass ein IFC-Modell übergeben werden muss.

Nach dem Entpacken der Zip-Datei besteht die BCF-Datei aus folgenden Komponenten:

- Ein Ordner für jedes Thema (Name ist Guid des Themas) mit mindestens den drei Dateien:
 - markup.bcf
 - viewpoint.bcfv
 - snapshot.png
- bcf.version

In der aktuellen Version des BCF-Formates ist es möglich, mehrere Blickpunkte, also Modellansichten, zu einem Problem/Thema hinzufügen. Für jeden Blickpunkt eines Problems werden die zwei Dateien *viewpoint.bcfv* und *snapshot.png* mit einem höheren Index dem Ordner für das Topic hinzugefügt.

Die XML-Datei *bcf.version* gibt an, welches BCF Schema, also welche Version, verwendet wird. Diese Datei ist in jeder BCF-Datei einmalig. Es gibt die Versionen 1.0, 2.0 und 2.1, welche fortlaufend entwickelt und in denen die Daten teilweise unterschiedlich beschrieben werden.

Die Datei *markup.bcf* ist ebenfalls in der XML-Sprache definiert. Sie beinhaltet generelle Informationen wie Ersteller der BCF-Datei, Beschreibung bzw. Kommentar, Status und Guid über den Mangel, der kommuniziert werden soll. In einem Kommentar kann beschrieben werden, worin der Fehler in der Konstruktion liegt. Zu jedem Topic können beliebig viele Kommentare hinzugefügt werden. So ist es möglich, dass mehrere Planungsbeeteiligte nacheinander Lösungsvorschläge oder Anmerkungen in nur einer BCF-Datei machen können bis das Problem gelöst ist. Für jeden Kommentar wird festgehalten, wann und von wem dieser erstellt wurde. Außerdem werden in der Datei *markup.bcf* die vorhandenen Blickpunkt und die dazugehörigen Screenshots aufgelistet

Für die genaue Beschreibung der Blickpunkte bzw. der Blickrichtungen gibt es die XML-Datei *viewpoint.bcfv*. In dieser werden der Kamerastandpunkt durch dreidimensionale Koordinaten und die Blickrichtung durch zwei Vektoren (vgl. Abbildung 3) beschrieben. Der Orthogonale Vektor ist dabei der Up-Vector, welcher immer im rechten Winkel zur Blickrichtung nach oben zeigt.

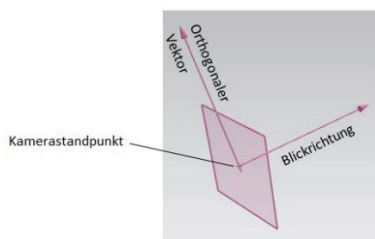


Abb. 3:
Veranschaulichung der Komponenten für die Definition eines Blickpunktes

4 Anforderungen an die BCF-Verwaltung

Aus dem vorher erläuterten Aufbau und der Funktionalität der BCF-Datei lassen sich nun Anforderungen für die Implementierung ableiten.

An erster Stelle ist hier zu erwähnen, dass durch die BCF-Datei ein Informationsaustausch ermöglicht werden soll. Um diese Anforderung zu erfüllen, muss in der BCF-Verwaltung sowohl das Erstellen von neuen BCF-Dateien als auch das Einlesen von bestehenden BCF-Dateien möglich sein. Es gibt also neben der Import- auch eine Exportfunktion. Darüber hinaus ist es wichtig, dass eine Art „Diskussion“ über das Problem erstellt und diese im Nachhinein nachvollziehbar ist. Um die Anforderung zu erfüllen, müssen sich neue Kommentare und neue Screenshots erstellen lassen.

Um bei einem Projekt mehrere BCF-Dateien mit mehreren Problemen bzw. Kommentaren und Blickpunkten in der BCF-Verwaltung angezeigt zu bekommen, muss die Oberfläche der Verwaltung mit mehreren Listen bzw. Strukturbäumen ausgestattet werden. Es ist bei der Umsetzung darauf zu achten, dass keine Informationen verloren gehen.

Eine weitere Anforderung, um mit BCF-Dateien effizient arbeiten zu können, stellt das Anzeigen des Problems bzw. des Blickpunktes im Modell selbst dar. Dafür ist eine Funktionalität in der BCF-Verwaltung zu schaffen.

Aus den genannten Anforderungen kann schließlich eine Klassenstruktur mit nötigen Attributen und Methoden und eine Oberfläche erstellt werden. Die Umsetzung der beiden Komponenten wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

5 Umsetzung der BCF-Verwaltung

Für die Implementierung wird mit der objektorientierten Programmierung mit der Sprache C# gearbeitet. Als CAD-Programm wird Siemens NX verwendet, welches ursprünglich aus dem Maschinenbau kommt und im Bauingenieurwesen besonders für trassengebundene Bauwerke geeignet ist. In dem gewählten CAD-Programm ist es bisher noch nicht möglich, BCF-Dateien zu im- oder exportieren. Eine Programmfunktion für die Oberflächengestaltung eigener Tools steht in dem verwendeten CAD-Programm zur Verfügung und durch die vorhandene Programmierschnittstelle (API) können eigene Tools in dem Konstruktionsprogramm erstellt und ausgeführt werden.

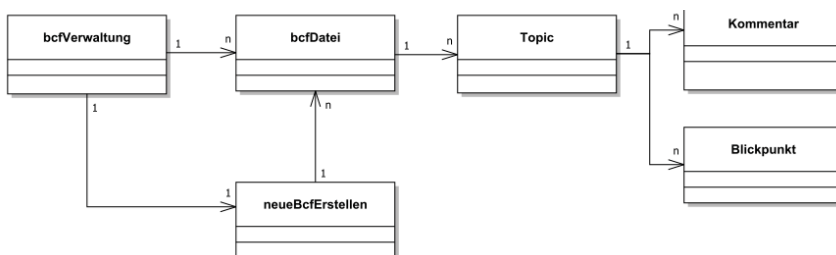


Abb. 4: UML (Unified Modeling Language) -Klassendiagramm

Das in Abbildung 4 gezeigte Klassendiagramm dient der Veranschaulichung und soll einen Gesamtüberblick über die verwendeten Klassen und deren Zusammenhang geben.

Die *befVerwaltung* ist insgesamt aus sechs Klassen aufgebaut. Die erste und oberste Klasse ist die *befVerwaltung*-Klasse. Diese dient im Programm als steuerndes Element, d. h. von dieser Klasse werden alle Funktionen der *befVerwaltung* aus gestartet und in der Klasse werden die Objekte der anderen Klasse verwaltet. Außerdem ist in der *befVerwaltung*-Klasse die *Main()*-Methode implementiert, welche beim Start des Tools ausgeführt wird.

Der Aufbau der Oberfläche wird durch eine externe Datei, der sogenannten DLX-Datei, gesteuert. Diese wird in der *Main*-Methode ausgelesen und somit die Oberfläche für das Tool in dem CAD-Programm erstellt. Die Funktionalität hinter der Oberfläche hingegen ist in der Klasse *befVerwaltung* implementiert. Dadurch ergibt sich eine Trennung zwischen dem Oberflächenaufbau und den Oberflächenfunktionalitäten, sodass diese getrennt voneinander bearbeitet werden können.

Für die Abbildung einer BCF-Datei gibt es die Klasse *befDatei*. Wird eine BCF-Zip-Datei durch den Nutzer in dem Tool importiert, wird ein neues Objekt der Klasse *befDatei* erstellt. Für die Speicherung aller Objekte dieser Klasse gibt es in der Klasse *befVerwaltung* eine generische Liste. Beim Erstellen des Objektes der Klasse *befDatei* werden die Attribute *version*, *name*, *projektID* und *dateipfad* vom Typ *String* mit Inhalten gefüllt. Die Attribute sind obligatorisch und können nicht leer bleiben.

Da eine BCF-Zip-Datei laut Definition der *buildingSmart* mehrere Topics/Probleme enthalten kann, gibt es in der Klasse *befDatei* wiederum eine generische Liste, in welcher sich Objekte der Klasse *Topic* befinden. Für jedes Problem wird ein Objekt erstellt und abgespeichert. Die Informationen aus der BCF-Zip-Datei zu jedem Problem werden als Attribute im Objekt abgespeichert. Dadurch besteht die Klasse aus vielen Attributen, welche allerdings nicht alle ausgefüllt werden müssen. Entscheidend ist dabei, welche Informationen durch die BCF-Datei übertragen werden.

Ein Topic kann wiederum aus mehreren Kommentaren und Blickpunkten bestehen. Es ist wichtig, dass jedem Kommentar ein Erstellungsdatum und ein Autorennamen zugeordnet sind, damit der „Gesprächsverlauf“ aus mehreren Kommentaren nachvollzogen werden kann. Die Objekte der Klasse *Kommentare* und *Blickpunkte* werden ebenfalls in generischen Listen in der Klasse *Topic* gespeichert. Es entsteht eine 1-zu-n-Beziehung zwischen den genannten Klassen.

Die Informationen aus der Markup-Datei werden beim Importieren in Attributen der Klassen *befDatei*, *Topic* sowie *Kommentar* gespeichert und die Daten aus der Viewpoint-Datei in den Attributen der Klasse *Blickpunkt*.

Für das Erstellen von neuen BCF-Dateien gibt es zusätzlich die Klasse *neueBcfErstellen*, welcher eine andere Oberfläche zugeordnet ist.

Um den Namen der Verwaltung gerecht zu werden, wird beim Start des Tools ein Ordner für das geladene Projekt im Konstruktionsprogramm erstellt. Ist dieser Ordner bereits vorhanden und wurden in der Vergangenheit schon BCF-Dateien erstellt oder in die Verwaltung importiert, werden diese beim Öffnen der *befVerwaltung* direkt eingeladen.

Für das Importieren neuer BCF-Zip-Dateien und das Laden bereits vorhandener Dateien, wird eine Methode *importieren(String befPfad)*, welche in der Klasse *befVerwaltung* im-

plementiert ist, verwendet. Beim Ausführen der Methode wird zuerst die BCF-Zip-Datei an ihrem Speicherpfad extrahiert. Dafür wird die Klasse *ZipFile* des Namespaces *System.IO.Compression* der .NET-Bibliothek verwendet. Es wird ein Objekt der Klasse *bcfDatei* instanziiert und in einer Liste gespeichert. Anschließend erfolgt das Auslesen der XML-Datei *bcf.version* mittels eines *XmlReaders*. Für jedes Topic ist in der BCF-Zip-Datei ein Unterordner vorgesehen. Diese werden mittels einer *foreach*-Schleife durchlaufen und für jeden Unterordner ein Objekt der Klasse *Topic* instanziiert. Die *markup.bcf*-Datei wird ebenfalls mittels eines *XMLReaders* eingelesen. Dabei wird die XML-Datei Zeile für Zeile mit einer *while*-Schleife durchlaufen und für jede Zeile in Abhängigkeit des Elementnamens ein anderes Vorgehen ausgeführt. Die so gewonnenen Daten werden in Attributen der Klasse *Topic* gespeichert. Für jeden Kommentar, der in der *markup.bcf*-Datei vorhanden ist, wird ein Objekt der Klasse *Kommentar* angelegt und für jeden Blickpunkt, auch viewpoint genannt, ein Objekt der Klasse *Blickpunkt*. Ein Problem beim Einlesen der Kommentare besteht darin, dass der XML-Elementname für den Kommentartext und der übergeordnete Knoten für jeden Kommentar gleich heißen und deshalb nicht eindeutig zugeordnet werden können. Das Problem kann gelöst werden, indem die Attribute der XML-Elemente verglichen werden.

Nachdem die XML-Dateien eingelesen und die Objekte der einzelnen Klassen erstellt wurden, werden die Screenshots, welche im Zip-Ordner als PNG-Bilder abgespeichert sind, den Blickpunkten über den Dateinamen zugeordnet. Anschließend müssen die Bilder in BMP-Bilder konvertiert werden, da das benutzte CAD-Programm nur diese anzeigen kann. Dafür wird die Klasse *Bitmap* der .Net-Bibliothek verwendet.

Da die BCF-Zip-Datei geändert werden kann, während die BCF-Verwaltung geöffnet ist, wird der extrahierte Ordner nicht sofort nach dem Einlesen wieder gelöscht, sondern erst, wenn die Verwaltung durch den Nutzer geschlossen wird.

Nachdem das Einlesen der Zip-Datei beendet ist, kann die Liste mit allen importierten BCF-Dateien in der Oberfläche aktualisiert werden.

Auf der Oberfläche sind mehrere Listen mit Informationen vorhanden. Wählt der Nutzer auf der Oberfläche eine BCF-Datei aus, werden die zugehörigen Kommentare, Blickpunkte und der Screenshot eines ausgewählten Blickpunktes angezeigt. Die *update*-Methode dient dazu, um auf die Aktion „Klicken“ des Nutzers innerhalb der Oberfläche reagieren zu können. Diese fungiert als Event-Handler und übergibt als Parameter, welches Objekt der Nutzer auf der Oberfläche verändert hat. Je nachdem, welches Objekt übergeben wird, wird eine andere Aktion ausgeführt. Beim Auswählen einer BCF-Datei beispielsweise werden die zugehörigen Informationen abgerufen und in der Oberfläche angezeigt.

Beim Drücken der Schaltfläche für das Erstellen einer neuen BCF-Datei wird ein Objekt der Klasse *neueBCFErstellen* instanziiert. Im Konstruktor dieser Klasse wird schließlich die andere Oberfläche gestartet. In dem CAD-Programm werden für zwei Oberflächen zwei Threads verwendet. Der Thread für das Hauptfenster startet automatisch beim Öffnen der BCF-Verwaltung. Für das Nebenfenster muss ein neuer Thread gestartet werden, welcher mit Schließen des Fensters beendet wird. Erst wenn der zweite Thread beendet ist, kann der erste Thread weiterlaufen. Für den Anwender bedeutet dies, dass beim Start der zweiten Oberfläche, der erste Dialog nicht mehr bedient werden kann, da diese gesperrt ist.

Nachdem der Nutzer die Daten zur neuen BCF-Datei eingegeben hat, wird daraus ein neues Objekt der Klasse *bcfDatei* erzeugt, welche zum Objekt der Klasse *bcfVerwaltung* zurückreferenziert wird. So ist es möglich das in der Klasse *neueBcfErstellen* erstellte Objekt der Klasse *bcfDatei* der Gesamtliste aller importierten BCF-Dateien hinzuzufügen. Anschließend wird die Blickrichtung aus dem CAD-Programm abgerufen und zusammen mit den eingegebenen Daten des Nutzers in XML-Dateien mit dem vorgeschriebenen Aufbau gespeichert. Ein Screenshot des aktuellen Modells wird ebenfalls konvertiert als PNG-Bild gespeichert. Zuletzt werden die XML-Dateien zu einem Zip-Ordner komprimiert. Der Nutzer kann die BCF-Zip-Datei aus dem BCF-Verwaltungsordner des aktuellen Projektes kopieren und zum Beispiel an einen anderen Planer verschicken.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Für das effiziente Arbeiten mit der BIM-Methode ist es unerlässlich, standardisierte, modellbasierte Kommunikationswerkzeuge wie BCF-Dateien zu verwenden. Mittels BCF-Dateien könne Probleme besser koordiniert und veranschaulicht werden.

Durch die Import- und Exportfunktion der *bcfVerwaltung* können sowohl BCF-Dateien importiert als auch neue Dateien erzeugt werden. Dies ermöglicht dem Nutzer das BCF-Format als Informationsaustauschformat zu nutzen. Die Speicherung aller zu einem Projekt gehörenden BCF-Dateien ermöglicht die Verwaltung an einer Stelle. Durch die Erweiterung der BCF-Datei um neue Kommentare bzw. Screenshots kann ein Kommunikationsverlauf, welche durch die Datierung nachvollziehbar und strukturiert wird, entstehen. Die Funktionalität des Anzeigens der Problemstelle im Modell ermöglicht auch bei sehr umfangreichen Projekten eine einfache Problemerkennung im Kontext, was einen erheblichen Mehrwert darstellt.

Um den Austausch zwischen mehreren Planungsbeteiligten zu verbessern, könnte die *bcfVerwaltung* die BCF-Dateien nicht an lokalen sondern an einem globalen Speicherort, wie z.B. einer Cloud (dt. Wolke) speichern. Die BCF-Dateien werden in einem Projekt-raum, auf den alle Beteiligten Zugriff haben, abgelegt. Beim Öffnen des Tools in dem jeweiligen Konstruktionsprogramm werden die Dateien automatisch abgeglichen. Es ist denkbar, dass Neuerungen der BCF-Dateien wie im E-Mail-Postfach direkt angezeigt und mit verschiedenen Status, z. B. gelesen, ungelesen, belegt werden.

Dadurch, dass die Unterklassen *bcfDatei*, *Topic*, *Kommentar*, *Blickpunkt* der *bcfVerwaltung* unabhängig vom Konstruktionsprogramm sind, lässt sich das Tool auch auf andere CAD-Programme übertragen.

Literatur

- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C. & BEERTZ, J. (HG.) (2015), Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden.
- BUILDINGSMART E.V., (2018), BCF-XML - ChangeLog.md.
[www.github.com/BuildingSMART/BCF-XML/blob/release_2_1/ChangeLog.md](https://github.com/BuildingSMART/BCF-XML/blob/release_2_1/ChangeLog.md) (18.01.2018).
- BIMPEDIA, (2018), BCF - BIM Collaboration Format. www.bimpedia.eu/node/1004 (13.02.2018).
- BUILDINGSMART E.V., (2018), BCF-XML - Documentation - README.md.
[www.github.com/BuildingSMART/BCF-XML/blob/release_2_1/Documentation/README.md](https://github.com/BuildingSMART/BCF-XML/blob/release_2_1/Documentation/README.md) (18.01.2018).

Modellierung und Simulation von ÖPNV auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen

Nico Diekmann¹ und Chris Schiermeyer²

Institut für Risiko und Zuverlässigkeit · Leibniz Universität Hannover · Callinstrasse 34 ·
30167 Hannover

¹E-Mail: diekmann@irz.uni-hannover.de

²E-Mail: schiermeyer@irz.uni-hannover.de

Shared Spaces sind Verkehrsflächen, die von mehreren Verkehrsarten gleichzeitig genutzt werden und gelten mittlerweile als integraler Bestandteil moderner Verkehrsplanung. Charakteristisch für derartige Verkehrsflächen ist eine durch Interaktionen der Verkehrsteilnehmer geprägte Dynamik an Stelle fester Vorfahrtsregelungen. Im innerstädtischen Bereich nimmt außerdem der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) eine zentrale Rolle im Gesamtverkehrskonzept ein. In diesem Beitrag wird ein Modell zur Abbildung der Verkehrsdynamik auf gemeinsam genutzten Verkehrsflächen unter der Berücksichtigung von ÖPNV beschrieben. Dazu wird zunächst ein bestehendes, auf dem Soziale-Kräfte-Modell basierendes, Modell zur Abbildung des Interaktions- und Konfliktverhaltens menschlicher Verkehrsteilnehmer vorgestellt. Dieses wird anschließend hinsichtlich der durch die Berücksichtigung von ÖPNV erweiterten Anforderungen erweitert. Für den Transport von Passagieren wurden Modellkomponenten entwickelt, um typische Einsteige-, Aussteige- und Warteprozesse an Haltestellen darzustellen. Um die Verkehrsdynamik unter Einbezug von ÖPNV realitätsgetreu abbilden zu können, werden Konfliktsituationen analysiert. Dabei werden sowohl Verhaltensweisen, die vom Individualverkehr übertragbar sind, als auch neue Effekte, wie beispielsweise das Behandeln von Situationen mit stehenden Verkehrsteilnehmern, aufgezeigt und dem Gesamtmodell hinzugefügt.

Keywords: Öffentliche Verkehrsmittel, Soziale-Kräfte-Modell, Shared Spaces

1 Einleitung

"Abgasfrei, leise und flächensparend" so beschreibt das UMWELTBUNDESAMT (2010) allgemein das aus ihrer Sicht umweltschonendste Verkehrsmittel. Vor allem in Zusammenarbeit mit dem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), spielen Fußgänger und Fahrradfahrer die bedeutendste Rolle im Hinblick auf eine umweltschonende Verkehrspolitik.

In den Niederlanden wurde das Konzept *Shared Space* entwickelt, wobei die Arbeiten größtenteils dem Verkehrsingenieur Hans Monderman zugeschrieben werden. Es thematisiert die Gleichberechtigung aller Verkehrsteilnehmer durch die weitgehende Aufhebung infrastruktureller Reglementierungen. Dadurch bieten derartige Verkehrsflächen insbesondere für die verletzlichsten Verkehrsteilnehmer (Fußgänger und Fahrradfahrer) ein hohes Maß an Attraktivität. Offizielle Shared-Space-Projekte sind in Deutschland eine Seltenheit. Es gibt jedoch viele Orte, an denen aufgrund des lokalen Aufbaus (bspw. herabgesenkter Bordstein) Verkehrsflächen als Shared-Space-Flächen genutzt werden, obwohl diese offiziell dafür nicht ausgeschrieben sind. Stadtbahnen werden durch ihren langen Bremsweg und ihrer Immobi-

lität aufgrund der Schienengebundenheit von anderen Verkehrsarten nur schwer als gleichberechtigt empfunden. Dennoch ist der Einbau von Stadtbahnen in das Modell sinnvoll, da es auch (wie oben beschriebene) Shared-Space-Verkehrsflächen gibt, auf denen Stadtbahnen genutzt werden und deren Einfluss auf den Gesamtverkehr untersucht werden soll.

Für Stadt- und Verkehrsplaner stellen Verkehrsflusssimulationen heutzutage ein bewährtes Werkzeug dar, um bereits in der Planungsphase objektive Beurteilungen von Entwürfen vornehmen zu können. Modelle, auf deren Grundlage derartige Simulationen durchgeführt werden können, sind ein aktuelles Thema in der Forschung (ANVARI et al. 2015, SCHÖNAUER et al. 2012). Die Ergebnisse dieser Simulationen sollen zur Bewertung der Verkehrssicherheit dienen. Daneben wäre jedoch auch denkbar, dass durch den Einbau von ÖPNV untersucht werden kann, welchen Einfluss Störverkehr auf den Fahrplan von ÖPNV bei hochfrequentierten Haltestellen hat.

In dieser Arbeit werden zunächst die Grundlagen einer entsprechenden Modellierung vorgestellt (Abschnitt 2). Darauf aufbauend werden in Abschnitt 3 notwendige Modellerweiterungen für die Integration von Prozessen in Hinblick auf ÖPNV aufgezeigt. Abschnitt 4 befasst sich mit den Interaktionen mit dem ÖPNV aus verkehrsdynamischer Sicht. In Abschnitt 5 wird eine Fallstudie zur Demonstration der erarbeiteten Modellkomponenten beschrieben.

2 Ein gemeinsames Modell für alle Verkehrsarten

Die ganzheitliche Modellierung der Verkehrsdynamik unter Betrachtung aller Verkehrsarten in einem gemeinsamen Modell ist aufgrund der Neuheit und der Komplexität von Verkehrsflächen nach dem Shared-Space-Entwurfsmuster ein aktuelles Forschungsthema im Bereich der Verkehrssimulation. Die größte Herausforderung stellt dabei eine realitätsgetreue Modellierung der Trajektorienwahl dar, da diese auf den betrachteten Verkehrsflächen zumeist nicht durch fest vorgegebene Fahrspuren, Bürgersteige, Radwege oder Vorfahrtsregeln bestimmt wird. Vielmehr wird sowohl die situationsabhängige Auswahl einer Trajektorie als auch das Lösen von Konfliktsituationen durch geometrische und psychologische Faktoren und vor allem durch Interaktionen der Verkehrsteilnehmer untereinander beeinflusst. Somit muss ein Simulationsmodell in der Lage sein, die Interaktionen realitätsgetreu abzubilden.

Ein entsprechendes Modell auf Basis des Soziale-Kräfte-Modells (SKM, HELBING & MOLNAR 1995), bei dem Fußgänger, Pkw- und Radfahrer berücksichtigt werden, wurde von SCHIERMEYER & TUCK (2015) im Detail vorgestellt. Dieses Modell stellt die Grundlage für die weitere Modellierung in Hinblick auf ÖPNV im Rahmen dieser Arbeit dar. Eine wesentliche Eigenschaft des zugrundeliegenden Modells ist die Unterteilung von Interaktionen in die drei Stufen *ungestörte Bewegung*, *vorausschauende* und *ad hoc-Konfliktvermeidung*. Diese werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

2.1 Ungestörte Bewegung

Jeder Verkehrsteilnehmer steuert ein Ziel an. Dafür ist eine Route erforderlich, welche zunächst unbeeinflusst von anderen Verkehrsteilnehmern geplant wird. Dazu wird ein Sichtbarkeitsgraph hinterlegt, welcher die Beziehungen zwischen Knotenpunkten abbildet und so eine Navigation durch polygonal berandete Gebiete und entlang an Hindernissen ermöglicht.

Die Routensuche ist zunächst eine Bestwegesuche, die den kürzesten Weg zum Ziel ermittelt. Beobachtungen haben jedoch aufgezeigt, dass Verkehrsteilnehmer oft einen Kompromiss aus dem kürzesten Weg und einer ruckfreien Trajektorie wählen. Die Form einer solchen Trajektorie lässt sich sehr gut mithilfe von Klothoiden abbilden (RINKE et al. 2017). Die Kombination einer Bestwegesuche mit einer Aneinanderreihung von Klothoiden resultiert in einer tangentialstetigen Trajektorie für den ungestörten Fall (*Free-Flow-Trajektorie*).

2.2 Vorausschauende Konfliktvermeidung

Konflikte sind vor allem auf Shared-Space-Flächen unausweichlich und es ist notwendig diese Situationen gesondert aufzuschlüsseln. Konflikte entstehen, wenn zwei oder mehr Verkehrsteilnehmern, deren Trajektorien sich kreuzen und diese erkennen, dass ein unverändertes Fortsetzen ihrer Bewegung eine Kollision zur Folge hätte. Konfliktsituationen fordern somit das Abweichen eines Verkehrsteilnehmers von seiner ungestörten Bewegung. In den meisten Fällen sind solche Situationen im Vorfeld gut abschätzbar und der Verkehrsteilnehmer kann bereits deutlich vor dem Eintritt der Gefahrensituation sein Verhalten an die entstehende Situation anpassen. Ein derartiges Konfliktverhalten lässt sich in Detektion, Klassifizierung und die letzte Reaktion gliedern.

Zu Beginn jedes Konflikts steht eine Konfliktdetektion, welche die menschliche Wahrnehmung darstellen soll und die Umgebung des jeweiligen Verkehrsteilnehmers analysiert. Dazu wird jedem Verkehrsteilnehmer ein Sichtfeld zugeordnet, in dem die weitere Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer entlang einer Lagrange-Kurve aus den beobachteten Aufenthaltspunkten extrapoliert wird. Anhand dieser Abschätzungen der Trajektorie und der Berücksichtigung der eigenen Route, kann über einen kurzen Zeitraum hinweg geplant werden, ob der Verkehrsteilnehmer mit seinen beobachteten Verkehrsteilnehmern in Konflikt steht. Die Konfliktdetektion wird detaillierter in RINKE et al. (2017) vorgestellt. Das Modell der Konflikterkennung durch Extrapolation lässt Fehleinschätzungen zu, wie sie auch häufig in der Realität zu beobachten sind.

Sollte es zum Erkennen eines Konflikts kommen, nimmt sowohl die verbleibende Zeit bis zum Unterschreiten des Sicherheitsabstandes als auch die Konstellation der Trajektorien Einfluss auf die Reaktion des analysierenden Verkehrsteilnehmers. Die verbleibende Zeit gibt Auskunft darüber, ob der Konflikt noch vorausschauend gelöst werden kann oder ob eine ad hoc-Reaktion ausgeführt werden muss, welche durch die dritte Stufe (Abschnitt 2.3) modelliert wird. Weiterhin wird ein Konflikttyp anhand der Anzahl und der Verkehrsarten der in Konflikt stehenden Verkehrsteilnehmer abgeleitet.

Konfliktsituationen im Straßenverkehr lassen sich durch eine Änderung der eigenen Verhaltensweise auflösen. Denkbar ist in diesem Zusammenhang eine Veränderung der Geschwindigkeit, der Trajektorie oder eine Kombination dieser Verhaltensweisen. Beobachtungen an realen Verkehrsknotenpunkten (RINKE et al. 2017) zeigen, dass für verschiedene Konflikttypen jeweils unterschiedliche Konfliktlösungsstrategien existieren. Die Entscheidung für eine bestimmte Strategie hängt maßgeblich von den Auswirkungen sowohl auf die weitere eigene Bewegung als auch auf die anderer Verkehrsteilnehmer ab.

Die vorausschauende Konfliktlösung wird durch eine Konfliktkraft ins SKM integriert. Diese wird der Formulierung von HELBING & MOLNAR (1995) additiv hinzugefügt. Die Gestalt der

Konfliktkraft hinsichtlich Größe und Richtung ist von der Situation und dem jeweiligen Konflikttyp abhängig. Für verschiedene Konflikte zwischen Fußgängern und/oder Kraftfahrzeugen wurde die Konfliktkraft von RINKE et al. (2017) detailliert erarbeitet.

2.3 Ad hoc-Reaktion

Das vorausschauende Verhalten kann die Entstehung unmittelbar bevorstehender Konfliktsituationen nicht gänzlich vermeiden, beispielsweise bei Fehleinschätzung der Situation oder wenn eine rechtzeitige Beobachtung anderer Verkehrsteilnehmer nicht möglich war. In derartigen Fällen hat die Vermeidung von Kollisionen oberste Priorität. Unabhängig von der Verkehrsart stellt starkes Abbremsen in Kombination mit abrupten Ausweichmanövern eine häufig zu beobachtende Verhaltensweise in solchen Situationen dar. Hier sind deutliche Parallelen zu einigen Effekten in dichten Fußgängerströmen zu erkennen. Daher lässt sich diese dritte Modellstufe qualitativ bereits sehr gut mit dem SKM abbilden. Dabei werden, abhängig von der Verkehrsart, Restriktionen der Richtungsänderung berücksichtigt.

3 Modellerweiterungen für ÖPNV

Das Kernstück dieser Arbeit bildet das Erweitern des in Abschnitt 2 beschriebenen Modells um ÖPNV. Öffentliche Verkehrsmittel zeigen besondere Verhaltensmuster, durch die das Modell sowohl in der Bewegungs- als auch in der Konfliktebene erweitert bzw. angepasst werden muss. In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Herausforderungen durch die Eingliederung von ÖPNV beschrieben und dazugehörige Modellanpassungen vorgestellt.

Beim Transport von Personen ist eine Unterteilung der Verkehrsteilnehmer in Passagiere und Transporter vorgenommen. Passagiere stellen eine Gruppe an Verkehrsarten dar, welchen es im modellierten Szenario ermöglicht sein soll, öffentliche Verkehrsmittel zu nutzen. Transporter hingegen sind die Verkehrsarten, welche Passagiere aufnehmen. Durch diese Einteilung wird die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Verkehrsszenarien vereinfacht, da so lokale Gegebenheiten nur an diese Gruppen angepasst werden müssen.

3.1 Zwischenziele und Haltestellen

Ziele beschreiben den Ort, den ein Verkehrsmittel letztendlich erreichen möchte. Das typische Verhalten eines Verkehrsmittels des ÖPNVs beinhaltet jedoch auch das Ansteuern mehrerer Orte nacheinander. Um dieses Verhalten zu modellieren, werden Zwischenziele eingeführt.

Zwischenziele unterscheiden sich im Gegensatz zu Zielen dadurch, dass der Verkehrsteilnehmer beim Erreichen stoppt und eine vordefinierte Zeit am Zwischenziel verharret. Anschließend wird das nächste Ziel des Verkehrsmittels als neues (Zwischen-) Ziel gesetzt.

Hinzu kommt die Definition einer Haltestelle. Haltestellen werden entworfen, um mehrere geographische Orte in einem Ziel zusammenzufassen. So ist es möglich, dass sowohl das öffentliche Verkehrsmittel als auch der Passagier das gleiche Ziel ansteuern, sich jedoch nicht auf den gleichen geographischen Ort zubewegen. Damit ist ein Szenario modellierbar, in dem ein Fußgänger in einem Wartebereich, beispielsweise auf dem Bürgersteig, wartet und der Bus auf der Fahrbahnseite an die Bushaltestelle heranfährt.

3.2 Transportprozess

Verkehrsteilnehmer, welche den ÖPNV nutzen möchten, müssen in der Lage sein, die entsprechenden Verkehrsmittel auch zu betreten bzw. zu verlassen. In diesem Abschnitt wird die Modellerweiterung um das Ein- und Aussteigen aus öffentlichen Verkehrsmitteln dargestellt. Anschließend wird die Modellkomponente eines Linienfahrplans beschrieben.

Da es beim Ein- und Aussteigen eines Passagiers in bzw. aus einem öffentlichen Verkehrsmittel unvermeidbar ist, dass die beiden Verkehrsteilnehmer in physischem Kontakt stehen, werden die abstoßenden Kräfte während des Transportprozesses im SKM annulliert.

3.2.1 Einstieg

Um mit einem öffentlichen Verkehrsmittel zu fahren, muss der Passagier, beispielsweise ein Fußgänger, an einer Haltestelle auf dieses warten. Fährt beispielsweise ein Bus eine Haltestelle an, baut der Fußgänger eine Trajektorie in Richtung des Mittelpunktes des Busses auf und beginnt sich in Richtung des Busses zu bewegen. Sollten mehrere Passagiere gleichzeitig versuchen dasselbe öffentliche Verkehrsmittel zu betreten, wird ihnen ein geordnetes Verhalten unterstellt, sodass es zu einer Einreihung kommt und sich ein Passagier nach dem nächsten dem Bus nähert.

Beim Einstieg kommt es durch das Nahekommen von ein- und aussteigenden Fahrgästen zu Interaktionen, welche über das SKM gelöst werden. Dadurch kommt es auch bei Begegnungen von mehreren Passagieren zu einer Traubenbildung, wie ist es auch in der Realität zu beobachten ist.

3.2.2 Transport

Während des Transports wird die Position des Fahrgasts gleichgesetzt mit der Position des Transportmittels, in welchem er sich befindet. Außerdem werden die Kräfte im SKM zwischen dem Fahrgast und allen anderen Verkehrsteilnehmern ignoriert.

3.2.3 Ausstieg

Stoppt ein öffentliches Verkehrsmittel, wird überprüft, ob die transportierten Verkehrsteilnehmer an der aktuellen Haltestelle aussteigen möchten. Steigt mehr als ein Passagier an der Haltestelle aus, kommt es zu einer Verzögerung des Aussteigens, um eine Überlappung der Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Der ausgestiegene Verkehrsteilnehmer baut zunächst eine Trajektorie zum Zielpunkt für Passagiere der aktuellen Haltestelle auf. Dort angelangt, wird der Passagier an das nächste Ziel weitergeleitet und der Transport gilt als abgeschlossen.

3.2.4 Linienfahrplan

Öffentliche Verkehrsmittel verfolgen im Allgemeinen einen Fahrplan. Um dieses Verhalten zu modellieren, können öffentliche Verkehrsmittel einer Linie zugeordnet werden, sodass Passagiere auch so auf das gewünschte Verkehrsmittel warten können. Ein Fahrplan wird entworfen, welcher die Abfahrtszeiten einer Linie von den jeweiligen Haltestellen enthält.

Die Wartezeiten werden erst bei der Ankunft des Verkehrsmittels an der jeweiligen Haltestelle berechnet. Dadurch können auch Verspätungen von öffentlichen Verkehrsmitteln modelliert werden. Im Falle einer Verspätung fährt das Verkehrsmittel direkt weiter, sobald kein Passagier mehr ein- oder aussteigen möchte.

3.3 Konfliktmechanismen

Konflikte auf Shared-Space-Verkehrsflächen sind unvermeidbar und es ist notwendig diese Situationen gesondert aufzuschlüsseln. Bei dem Entwurf der unterschiedlichen Konfliktverhalten muss auf jede Verkehrsart im Einzelnen eingegangen werden, da die verschiedenen Verkehrsarten auch unterschiedlich mit Konflikten umgehen. PASCUCCI et al. (2018) haben ein datenbasiertes Entscheidungsmodell erarbeitet. Dabei wurde ein generelles Konfliktlösungsverhalten für Fußgänger und Pkw entwickelt. Um dem ÖPNV ebenfalls ein solches Entscheidungsmodell zuzuordnen, wären Realdaten notwendig, welche bisher noch nicht erhoben wurden. Vorerst wird davon ausgegangen, dass das Verhalten von Pkw-Fahrern auf Fahrer des ÖPNV übertragbar ist. Auf dieser Grundlage werden Modellannahmen getroffen, um ein Konfliktverhalten modellieren zu können.

Beobachtungen haben gezeigt, dass Pkw-Fahrer in Konfliktsituationen ihre Trajektorie nicht ändern, sondern ihre Geschwindigkeit verringern. Dieses Verhalten wurde auch auf Busfahrer übertragen. Für Straßenbahnfahrer wurde dieses Prinzip ebenfalls übernommen, da diese letztlich aufgrund der Schienengebundenheit auch nicht in der Lage wären, auszuweichen.

Bei Fußgängern wurde festgestellt, dass diese unterschiedlich auf Pkw und Fußgänger reagieren. Ein Fußgänger-Fußgänger-Konflikt wird meist mittels ausweichen gelöst. Beide Fußgänger sind gleichberechtigt im Konflikt, sodass situationsabhängig entschieden wird, welcher von beiden ausweicht. Bei einem Fußgänger-Pkw-Konflikt wurde das Phänomen beobachtet, dass Fußgänger Pkw oft Vorfahrt gewähren und sich bewusst unterordnen. Der Fußgänger verringert währenddessen seine Geschwindigkeit auf ein Minimum, bleibt jedoch nur in Ausnahmefällen tatsächlich stehen. Auch hier wurde das Verhalten von Fußgängern gegenüber Pkw auf den ÖPNV übertragen.

Da das Modell um Zwischenziele erweitert wurde, wird den Verkehrsteilnehmern ermöglicht an Orten zu warten. Nähert sich beispielsweise ein Fußgänger, welcher auf die gegenüberliegende Seite eines stehenden Verkehrsmittels gelangen möchte, muss dieser ausweichen. Dabei plant der Fußgänger eine Trajektorie entlang des stehenden Verkehrsmittels unter Berücksichtigung des minimalen Sicherheitsabstandes.

Weiterführend sind hier Ansätze denkbar, in denen der Fußgänger berücksichtigt, dass das Risiko der Weiterfahrt des stehenden Verkehrsmittels mit längerer Wartezeit steigt und seine Trajektorie entsprechend im Voraus anpasst. Demgegenüber wäre ein Szenario denkbar, indem ein Fußgänger ein öffentliches Verkehrsmittel an einer Haltestelle stehen sieht und gewollt ist, in dieses noch einzusteigen. Der Fußgänger würde dann seine Geschwindigkeit erhöhen und auch eine höhere Risikobereitschaft beim Lösen von Konflikten aufzeigen.

5 Anwendungsbeispiel

In diesem Abschnitt soll die Anwendung der Simulation dargestellt werden. Dazu wurde die Kreuzung vor der Ernst-August-Galerie in Hannover in das Modell übertragen. Begründet wird diese Auswahl damit, dass dort eine Interaktion zwischen allen Verkehrsarten zu beobachten ist. Es wird ein Szenario initiiert, bei dem ein Fußgänger auf eine stehende Straßenbahn zu läuft und gezwungen ist, seine Trajektorie umzudefinieren.

Die Simulationen liefern auf Grundlage des erweiterten Modells in der Realität zu beobachtete Verhaltensweisen. Bislang wurden allerdings nur künstliche Szenarien erzeugt und simuliert. Um die vorerst geschätzten Parameter zu kalibrieren und zu validieren, sind Realdaten notwendig, deren Erhebung derzeit noch aussteht.

6 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Modell zur Simulation der Dynamik auf Verkehrsflächen nach dem Shared-Space-Entwurfsmuster erweitert, um den Anforderungen, die sich durch die gemeinsame Betrachtung von Fußgängern, Radfahrern, Pkw und ÖPNV ergeben, gerecht zu werden. Dabei wurde neben Transportprozessen ein besonderes Augenmerk auf die Interaktion zwischen Individualverkehr und ÖPNV gelegt. Dazu zählen zum einen eine realitätsgetreue Modellierung des menschlichen Verhaltens bei Ein- und Aussteigeprozessen, zum anderen das Verhalten im Konfliktfall, wenn ÖPNV involviert ist.

Die Funktion und das Zusammenspiel der einzelnen Modellkomponenten wurden qualitativ durch die Simulation verschiedener künstlicher Szenarien demonstriert. Sobald die Modellbildung vollkommen abgeschlossen ist, können Bewertungen bei geplanten baulichen Veränderungen von Verkehrsflächen über die entwickelte Simulationsumgebung bereits im Vorfeld durchgeführt und die infrastrukturelle Auslegung ggf. angepasst werden.

Simulationsergebnisse, die mit dem vorgestellten Modell erzielt werden, sind vollständig deterministisch. Um eine realitätsgetreue Streuung zwischen den Verhaltensweisen einzelner Verkehrsteilnehmer zu erzielen und die Sensibilität von Simulationsergebnissen gegenüber abweichendem Verhalten untersuchen zu können, wird derzeit an der Integration stochastischer Methoden in verschiedene Modellkomponenten gearbeitet.

Literatur

- ANVARI, B., BELL, M. G., SIVAKUMAR, A. & OCHIENG, W. Y. (2015), Modelling shared space users via rule-based social force model. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 51, S. 83-103.
- HELBING, D. & MOLNAR, P. (1995), Social force model for pedestrian dynamics. In: *Physical review E* 51, 5, S. 4282.
- PASCUCCI, F., RINKE, N., SCHIERMEYER, C., BERKHAHN, V. & FRIEDRICH, B. (2018), Should I Stay or Should I Go? A Discrete Choice Model for Pedestrian–Vehicle Conflicts in Shared Space. In: *Transportation Research Record: Journal of the TRB*.
- RINKE, N., SCHIERMEYER, C., PASCUCCI, F., BERKHAHN, V. & FRIEDRICH, B. (2017), A multi-layer social force approach to model interactions in shared spaces using collision prediction. In: *Transportation Research Procedia*. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.144
- SCHIERMEYER, C. & TUCK, K. (2015), Ein multi-modales Soziale-Kräfte-Modell für gemeinsam genutzte Verkehrsflächen. 27. Forum Bauinformatik, Aachen.
- SCHÖNAUER, R., STUBENSCHROTT, M., HUANG, W., RUDLOFF, C. & FELLENDORF, M. (2012), Modeling concepts for mixed traffic: Steps towards a microscopic simulation tool for shared space zones. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2316, S. 114-121.
- UMWELTBUNDESAMT (2010), Fußgänger- und fahrradfreundliche Stadt, www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/kommunal-mobil/rad-fussverkehr/fussgaenger-fahrradfreundliche-stadt#textpart-3 (10.08.2017).

Optimierung der Baustelleneinrichtung anhand gemischtganzzahliger Programmierung und evolutionärer Algorithmen

Meiling Shi

Technische Universität Darmstadt · Institut für Numerische Methode und Informatik im Bauwesen ·
Franziska-Braun-Straße 7 · 64287 Darmstadt ·
E-Mail: shi@iib.tu-darmstadt.de

Die Baustelleneinrichtung (BE) spielt eine wichtige Rolle für die erfolgreiche Abwicklung eines Bauvorhabens. Die Optimierung der BE steht schon seit langem im Fokus der Praxis und der wissenschaftlichen Forschungen. Wegen der Komplexität der Einschränkungen unter vielfältigen BE-Elementen und der Einzigartigkeit des Bauvorhabens lassen sich keine allgemeine Lösung für BE Planung ergeben. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich hierfür mit der Entwicklung einer nicht projektspezifischen Methodik, die die BE-Planung quantitativ formuliert und zugleich die gesamten Betriebskosten optimiert. Das Optimierungsproblem wird durch die gemischtganzzahlige Programmierung mathematisch formuliert. Zur Optimierung werden die evolutionäre Algorithmen als Lösungstechnik genutzt. Dazu gehören die genetischen Algorithmen und die Evolutionsstrategie. Weiterhin werden verschiedene evolutionäre Operatoren und Methoden verwendet. Ihre Performanz zur Lösung der BE-Optimierungsprobleme wird durch einen Anwendungsfall dargestellt und analysiert.

Keywords: Baustelleneinrichtung, Optimierung, Evolutionäre Algorithmen, Baulogistik

1 Einleitung

Die Baustelleneinrichtung (BE) dient der temporären Unterbringung für Arbeitskräfte, Geräte, Maschinen sowie Lagerflächen. Eine durchgeplante BE bringt Einsparung bei Kosten, Einhaltung der Bauzeit und sorgen somit für das Gelingen des Bauvorhabens. Besonders bei Großflächigen Bauvorhaben konsumieren die Transportwege einen großen Teil der Projektzeit. Allerdings besteht eine komplette und allgemein gültige Lösung für die Optimierung der BE noch nicht (MAWDESLEY & AL-JIBOURI 2003). Wegen Einzigartigkeit und Komplexität des Bauprojekts wird die Baustelleneinrichtungsplanung in der Praxis meistens auf Basis der Erfahrung von Experten erstellt. Da besteht die Gefahr, dass besonders bei komplexeren Baustelle nicht alle Aspekten berücksichtigt werden können. Darüber hinaus geschieht die Planung meistens subjektive. Daraus entsteht nach wissenschaftlicher Ansicht das Bedürfnis nach einer quantitativen, allgemeingültigen Herangehensweise für die Baustelleneinrichtungsplanung.

Der Kern für die Optimierung der BE ist eine formelle Definition von Baustellen und die darauf stehenden Einrichtungen. Im Folgenden sind die am verbreitetsten Repräsentation für Baustellen und für die Einrichtungen. (MELLER & GAU 1996), (LIGGETT 2000), (DRIRA, PIERREVAL & HAJRI-GABOUJ 2007) und (SADEGHPOUR & ANDAYESH 2015) infolge ist Quadratische Zuordnungsmodell das einfachste Modell für Layoutplanung, in dem n BE-Elemente in n (oder $n+$) vordefinierten Segmenten zugewiesen werden. Mit gemischtgan-

zahliger Programmierung (engl. Mixed Integer Programming, kurz MIP) bzw. Gittersystem werden die Baustelle durch orthogonale Gitterzelle definiert. Ein Element kann entweder in einer Zelle oder in multiple Zellen platziert werden. Die Positionen der Elemente referenzieren auf die Zellenkoordinaten, die diskret vorgegeben sind. Als das rechenintensivste als auch genaueste Modell werden die Baustelle als ein kontinuierliches Quantum modelliert (WEICKER 2015). Die Elemente können dadurch ihre Positionen überall auf der Baustelle platziert werden, ohne Beschränkungen wie Gitterlinien oder vorgegebene Segmente.

Das BE-Optimierungsproblem (engl. Construction Site Layout Planing, kurz CSLP) gehört zu den NP-Schwere Problemen. Zahlreiche Methode wurden wegen seiner schweren Lösbarkeit entwickelt. Dazu gehören Techniken wie wissensbasierte System, künstliche neuronale Netzwerk, Metaheuristiken, mathematische Programmierung usw. (MELLER & GAU 1996) (LIGGETT 2000) (EASA & HOSSAIN 2008).

Dieser Artikel beschreibt eine Methodik, die die BE-Planung mit gemischtganzzahliger Programmierung formuliert und ihre Betriebskosten mit zwei unterschiedlichen evolutionären Algorithmen optimiert. Zur Implementierung des Optimierungskonzepts wird ein vereinfachtes virtuelles Projekt demonstriert. Im ersten Teil werden evolutionäre Algorithmen vorgestellt. Anschließend wird die Problemmodellierung mit gemischtganzzahliger Programmierung demonstriert und mit EA numerisch berechnet. Zuletzt werden die Ergebnisse analysiert.

2 Evolutionäre Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen (kurz EA) sind eine Klasse von stochastischen Such- und Optimierungsverfahren. Sie gehören zu den iterativen Verbesserungsansätzen im Optimierungsproblem. In jeder Iteration arbeiten EA parallel an einer Anzahl von potenzielle Lösungskandidaten, die als Chromosom benannt sind. Auf das Chromosom setzen die EA die evolutionären Operatoren Mutation und Rekombination ein, um Lösungen zu variieren und zu reproduzieren. Die Operatoren wirken sich in der Regel zufällig auf die Kandidaten aus, der gesamten Suchprozess wird aber durch das Prinzip „die Stärkeren überlebt“ gesteuert, indem nur die Lösungen, die bessere Zielfunktionswerte liefern, in der nächsten Iteration zugelassen werden. Dadurch können die guten Eigenschaften in den nächsten Iterationen fortgesetzt werden und dies am Ende zu einer guten Lösung führen (WEICKER 2015).

EA unterteilen sich in vier Kategorien: Genetische Algorithmen (kurz GA), Evolutionsstrategie (kurz ES), evolutionäre Programmierung (kurz EP) und genetische Programmierung (kurz GP). In diesem Artikel werden GA und ES verwendet. Die wichtigen Bestandteile zur Implementierung der EA für Optimierungsprobleme nach (KRUSE et al. 2015) sind:

- eine Kodierung, die die Lösungskandidaten in Chromosom umformuliert. Die in der Praxis allgemein verwendeten Kodierungsformen sind: Binär-Kodierung, Realzahl-Kodierung, Ganzzahlkodierung und Permutationskodierung.
- eine Methode zur Erzeugung der Anfangspopulation. Diese kann je nachdem ob Vorwissen vorhanden sind, rein zufällig oder auf Vorwissen basierend erzeugt werden. Wichtig ist, dass die Lösungskandidaten möglichst breit im Suchraum verteilt sind, um die Dominanz vom Sub-Suchraum bzw. von früher Konvergenz zu vermeiden.
- eine Fitness-Funktion (Zielfunktion) zur Bewertung der Individuen. Die Funktion misst die Lösungsqualität und weist den Lösungskandidaten einen Fitnesswert zu.

- eine Selektionsmethode auf Basis der Fitnesswert für Paarungsselektion und Umweltselektion. Selektionsverfahren haben die Aufgabe, aus den vorhandene Individuen eine Population zusammenzustellen, die sowohl eine möglichst große Vielfalt erhalten, als auch die besseren Individuen aufnehmen (WEICKER 2015, 67-68)
- eine Reihe genetischer Operatoren, nämlich Rekombination und Mutation, um die Nachkommen zu erzeugen. Die Operatoren unterstützen bei der Erforschung im Suchraum und Feinabstimmung im Bereich des Optimums.
- ein Abbruchkriterium. Ein EA wird solange laufen, bis die Abbruchkriterien erfüllt sind. Daraus ergibt sich die endgültige Lösung. Die Abbruchkriterien können ebenfalls die Lösungsqualität beeinflussen. Früher Abbruch kann zum lokalen Optimum führen; zu später Abbruch ist eine Verschwendung der Rechnerressourcen.
- prozessrelevante Parameter. Dazu gehören z. B. die Populationsgröße, der Selektionsdruck, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Mutationen und Rekombination usw.

3 Mathematische Modellierung der BE-Planung

3.1 Optimierung

Um ein Optimierungsproblem mathematisch zu formulieren werden folgenden Elemente benötigt (WEICKER 2015, 20): Eine (oder mehrere) Zielfunktion(en) f , die jedem Lösungskandidaten einen Güterwert zuweist und deren Optimum gefunden werden soll; Ein Suchraum Ω mit oder ohne Randbedingungen, der aus einer Mengen zulässiger Werte für die Variablen besteht.

3.2 BE-Planung modellieren

Im Prototype werden folgende BE-Elementen betrachtet: Turmdrehkran, Pausenräume, Büro- und Besprechungsräume, Magazine für Werkzeuge, Werk und Bearbeitungsflächen für Stahl- und Schalungsverarbeitung, Lager- und Stellflächen für Stahlstange und Schalungen sowie Bauaufzüge. Das Ziel ist die effektivste Verwaltung und Koordinierung von BE-Elemente mit unterschiedlichen Flächen auf der Baustelle zu optimieren, sodass die Kosten (Anschaffen- sowie Betriebskosten) der BE-Elemente und die Förderkosten für Ressourcen minimiert werden.

Als die kostenintensivste Maschine auf der Baustelle sollen Kräne in ihrer Dimensionierung und Platzierung zuerst festgelegt werden. Die Optimierung erfolgt durch Variation der technischen Parameter und der Positionierung auf der Baustelle. Anschließend werden die Positionen der restlichen Elemente auf Basis der festgelegten Kranplanung platziert, weil sie bei der Platzierung deutlich flexibler sind als die Kräne. Das Ziel ist die Gesamtwegstrecken zwischen den einzelnen BE-Elementen bzw. zu dem Fertigungsschwerpunkt zu minimieren.

3.2.1 Problem modellieren und Suchraum definieren

Die Baustelle ist durch ein kartesisches Gitter formuliert, wo der Abstand nach Anforderung angepasst werden kann. Die BE-Elemente werden durch Vierecke mit vordefinierter Länge und Breite repräsentiert. Die geometrisch zentralen Punkte der Elemente symbolisieren ihre Positionen. Die Abstände zwischen den Elementen werden mit Manhattan-Distanz

definiert. Aus praktischer Sicht repräsentiert die Manhattan-Distanz die reale Abstände auf einer Baustelle besser als die euklidische Distanz (EASA & HOSSAIN 2008).

Die Komponenten des Problems werden im Folgenden repräsentiert:

- der Grundriss der Baustelle ist ein 2D Koordinatensystem S
- die Geometrie der Baustelle: die Länge L in x Richtung und Breite W in y Richtung
- das Bauwerk B , seine Länge l_B , Breite w_B , zentrale Punkt (x_B, y_B) und die Koordinatenmenge innerhalb des Bauwerks S_B
- der Einrichtungsindex i, j wobei $i, j \in \{1, \dots, N\}$ (N = die Anzahl der zu platzierenden Einrichtungen)
- die Länge l_i und Breite w_i der Einrichtung i
- (x_i, y_i) ist der zentrale Punkt der Einrichtung i
- der Abstand $d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$ zwischen den Einrichtungen i und j
- die Kosten c_i der Einrichtung i
- Gewichtungsfaktor R_{ij}

Zur Demonstration werden unterschiedliche Krantypen vorgegeben. Die optimale Kombination wird daraus ergeben, die die gesamten Kosten minimiert und das Bauwerk vollständig abdeckt. Der Suchraum ist dementsprechend durch die vorgegebene Kranobjekten $\Omega \in (K = \{k_1, k_2 \dots k_m\})$ definiert. Da die Auswahl der Arten und Dimensionen jeder einzelnen Elemente sich stark nach der Menge der einzulagernden Stoffe richtet, werden ihre Dimensionen vom Planer vordefiniert. Der Gesichtspunkt ist hierbei die Suche nach der optimalen Platzierung, d. h. die Koordinaten (x_j, y_j) der einzelnen Elemente j . Der Suchraum jeder Elementposition ist durch alle freie Koordinaten auf der Baustelle: $(x_j, y_j) \in \{S_{frei}\}$ definiert.

3.2.2 Zielfunktion

Die Kosten für Kräne bilden sich in Anlehnung an die Kostenermittlung für Großgeräte in (SCHACH & OTTO 2011, 362).

$$\min G(k) = \sum c_{ki} \quad (1)$$

Bei der Lösungssuche sollen drei Randbedingungen berücksichtigt werden:

- a) Die gesamte Fläche des zu errichtende Bauwerks sollte abgedeckt werden,

$$S_{k_1} \cup S_{k_2} \dots \cup S_{k_m} \geq S_B \quad (2)$$

S_{ki} ist die Menge von Koordinaten unterhalb des Schwenkbereichs des Krans k_i ,

- b) Ausreichende Sicherheitsabstände s_i zum Bauwerk.

$$\|x_{ki} - x_g\| \geq (l_{ki} + l_B + s_i) \text{ und } \|y_{ki} - y_g\| \geq (w_{ki} + w_B + s_i) \quad \forall i \quad (3)$$

- c) Krane sollen sich nicht gegenseitig behindern. Die Luftlinie zwischen zwei beliebigen Kranen darf nicht größer sein als die längere Ausladung r .

$$\sqrt{(x_{ki} - x_{kj})^2 + (y_{ki} - y_{kj})^2} > \max(r_{ki}, r_{kj}) \quad \forall i, j \quad (4)$$

Bei der Minimierung der gesamten Wegstrecken basiert die Zielfunktion auf der gewünschten Abstandbeziehung der Elemente zueinander, was durch einen Gewichtungsfaktors R_{ij}

ausgedrückt wird. Die Abstandbeziehung zeigt, ob es bevorzugt ist, Elemente i und j nah beieinander oder weit weg voneinander zu platzieren sind. Konventionell richtet sich die Abstandbeziehung durch die Ressourcentransportmenge oder die Transportkosten unter den Elementen (MAWDESLEY, AL-JIBOURI & YANG 2002), (EASA & HOSSAIN 2008), (LI & LOVE 2000), (MELLER & GAU 1996). In (ELBELTAGI, HEGAZY, & ELDOSOUKY 2004) wurde das Verhältnis durch negative Werte in der Gewichtung erweitert, um den Sicherheitsfaktor zu berücksichtigen. In diesem Artikel wird die erweiterte Variante verwendet. Tabelle 1 zeigt die erwünschte Verhältnis Gewichtungsfaktor R_{ij} . Daraus ergibt sich die Zielfunktion für die Minimierung der Wegstrecken:

$$\min F = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij} R_{ij} + P \quad (5)$$

wobei N = Anzahl der Elemente; P = Straffunktion. Die während der Platzierung der anderen Elemente zu betrachtenden geometrischen und betrieblichen Randbedingungen sind:

- d) Keine Überlappung zwischen den Elementen bzw. zwischen Elementen und festen Einrichtungen.

$$\|x_i - x_j\| \geq (l_i + l_j) \text{ und } \|y_i - y_j\| \geq (w_i + w_j) \quad \forall i, j \quad (6)$$

- e) Die durch Krane bedingte BE-Elemente (z.B. Lagerfläche, Magazine und Werkfläche, ihre Sammlung repräsentiert durch P) sollen im Schwenkbereich der Kräne sein.

$$(x_i, y_i) \in S_{k_1} \cup S_{k_2} \dots \cup S_{k_m} \quad \forall i \text{ in } Q \quad (7)$$

- f) Die durch Krane bedingte BE-Elemente sollen im Schwenkbereich möglich gleichmäßig verteilt sein, damit jeder Kran gleiche Arbeitsintensität hat.
g) Sozial- und Büroeinrichtungen (ihre Sammlung repräsentiert durch Q) sollen außerhalb Schwenkbereich der Kräne stehen.

$$(x_j, y_j) \notin S_{k_1} \cup S_{k_2} \dots \cup S_{k_m} \quad \forall j \text{ in } Q \quad (8)$$

Die oben genannten Bedingungen beschreiben nur eine vereinfachte Version der gesamten Auswahlkriterien. In der Praxis ist es deutlich komplexer. Für die harten Bedingungen (3) (4) und (6) wird sicherheitsbedingt die Krippentod-Methode verwendet, so dass die Lösung verworfen wird beim Verstoß der Randbedingungen; für Bedingungen (2) (7) und (8) wird Straffunktion angesetzt, nämlich ein großer Strafwert wird zur Zielfunktion addiert.

3.3 Optimierung durch EA

Angeichts der Vielfältigkeit am Verfahren von EA werden GA und ES jeweils mit verschiedenen Operatoren umgesetzt, um die Optimierungsergebnisse miteinander vergleichen und die Geeignetheit der Algorithmen für das Problem bewerten zu können.

3.3.1 Decodierung der Lösungskandidaten

Veranlasst durch die Problemformulierung mit MIP wird die Ganzzahl-Kodierung verwendet. Hierfür sollen technische und betriebliche Eigenschaften der Elemente (z. B. Elementtype, Produktname, Länge, Breite sowie elementspezifische Parameter) miteinbezogen werden. Deswegen wird zugunsten der Zielfunktionsberechnung und Berücksichtigung der Randbedingungen eine Kodierung durch die Kombination der Elemente e_i und deren Koordinate (x_i, y_i) (referenziert auf Gittersystem) entwickelt:

$$\text{Individuum} = [(x_1, y_1, e_1), (x_2, y_2, e_2) \dots (x_N, y_N, e_N)] \quad (9)$$

Die ganze Liste bildet ein Chromosom ab, jede Zelle (x_i, y_i, e_i) in der Liste ist entsprechend ein Gen. Die evolutionäre Operatoren können sowohl auf die Koordinate (x_i, y_i) als auch auf die Kranarten angesetzt werden.

3.3.2 Startpopulation initialisieren

Um eine abgewogene Mitte zwischen der Ausnutzung des Vorwissens von Experten und dem Vermeiden vorzeitiger Konvergenz zu finden, werden in dieser Arbeit zufällige und Vorwissen-basierende Initialisierung kombiniert. Die zweite Methode nimmt die von Experten vorgeplante Platzierung als Basis und ändert die Koordinaten durch Normalverteilung oder durch den Mutationsoperator Random Zurücksetzen.

3.3.3 Erzeugen neuer Generation durch Mutation und Rekombination

Während der Entwicklung der Prototype lässt es sich feststellen, dass die Rekombination oft die harten Randbedingungen stößt und zu endloser Schleifen führt. Deswegen wird hier nur Mutation zur Erzeugung neuer Generation verwendet. In GA werden die Kriechmutation und Random Zurücksetzen eingesetzt. Die Mutationswahrscheinlichkeit bzw. die Mutationsschritte bleiben konstant. Das Wiedereinfügen geschieht durch zufälliges Ersetzen der Individuen in der Elternpopulation mit den Nachkommen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das elitäre Wiedereinfügen zur frühen Konvergenz führen. Die ES unterscheiden sich von GA durch die Anpassung der Mutationsschrittweiten im Optimierungsprozess. Hier wird die Gauss-Mutation angesetzt. Für die Anpassung der Mutationsschrittweite werden die 1/5-Erfolgsregel und die Selbstadaptation (WEICKER 2015, 134-140) verwendet. Ein anderes Merkmal bei ES ist das Selektionsprinzip. Die Selektion in EA ist ein strenger Elitismus: Nur die besten Individuen kommen in die nächste Generation.

3.3.4 Selektion

Die Selektionsmethode entscheidet wie die Individuen entsprechend ihrer Fitnesswerte ausgewählt werden. In diesem Artikel werden alle vier Selektionsmethode angesetzt.

3.3.5 Abbruchkriterien

Als Abbruchkriterium wird die maximale Anzahl von Generationen ausgewählt. Sein Vorteil liegt an der Garantie, dass der Optimierungsprozess beendet werden kann.

3.4 Numerische Berechnung

Das Konzept wird durch ein Programm BOS demonstriert. Die Geometrie der Baustellen und zu platzierende Elemente können momentan nur im Code definiert werden. Die EA Verfahren und genetische Operatoren sind modular gebaut, deren Parameter können nach Anforderung der Anwender variiert werden. Dies ermöglicht eine flexible Zusammensetzung des Optimierungsverfahrens. Als Output wird die optimale Lösung in Graphik mit Fitnesswerte und verwendete Operatoren automatisch erstellt. Abb. 1 stellt ein Ausgangspunkt der Planung dar. Nach 200 Generation ergibt die Lösung in Abb. 2 aus. Das Bauwerk ist vollständig unter Kranschwenkbereich. Ebenfalls sind BE-Elemente wie Lagerfläche, Bearbeitungsfläche und Magazine. Die sozialen Räume befinden sich außerhalb Kranschwenkbereich wegen Sicherheitsgründen.

Insgesamt werden 32 Runden mit unterschiedlichen Verfahren und Operatoren numerisch berechnet. Die Ergebnisse werden in Abb. 3 dargestellt. Aus der gesamten Betrachtung sind die GA mit Abbrechen- bzw. Turniererlektion zur Optimierung der BE-Planung besser geeignet. Ob die daraus ergebene Lösung wirklich die optimale Planung ist, kann hier nicht validiert werden. Mit einem Referenzprojekt könnte die Ergebnisse besser beurteilt werden.

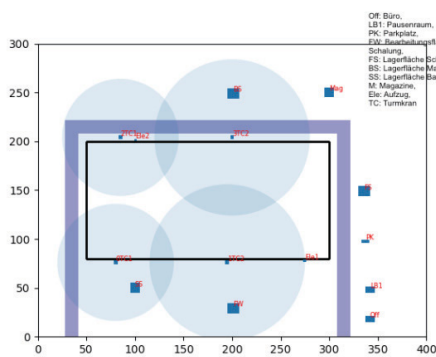


Abb. 1: Planung der 1. Generation

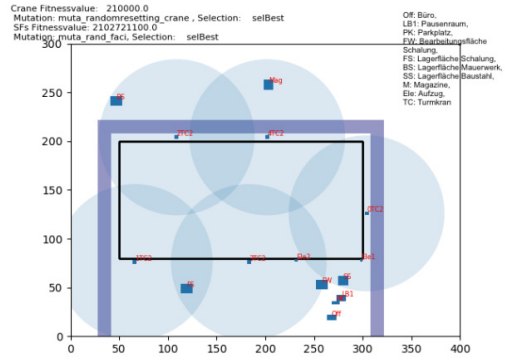


Abb. 2: Beste Lösung aus einem Verfahren

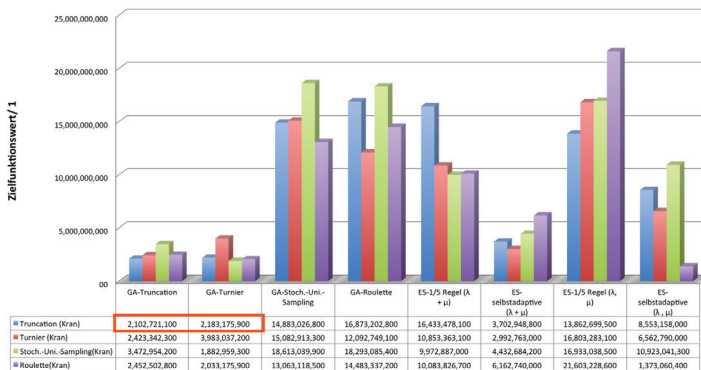


Abb. 3: Ergebnisse der BE-Optimierung mit EA

4 Zusammenfassung

Der vorliegenden Artikel präsentiert eine Herangehensweise zur Optimierung der Baustelleneinrichtungsplanung anhand von EA. Die BE-Planung unterteilt sich in zwei Optimierungsaspekte: Die optimale Auswahl und Platzierung der Kräne sowie die optimale Platzierung der restlichen BE-Elemente. Modellierung angesetzt. Die Probleme wurden mathematisch durch das MIP wegen seiner Robustheit und problemspezifischen Anpassungsfähigkeit formuliert. Als Optimierungsalgorithmen sind GA und ES mit verschiedenen Operatoren und Varianten angesetzt. Zur Demonstration des Konzepts wurde das Programm BOS in Python Skript geschrieben. Die Funktionsweise wurde numerisch getestet. Bei jedem Lauf bietet BOS dem Benutzer mehrere Lösungskandidaten an, die durch unterschiedliche Algorithmen generiert sind. Daraus kann der Benutzer die beste Planung auswählen und

weiter verfeinern. Aus den Ergebnissen lässt es sich ableiten, dass die EA gute Lösungen liefern können. Ihre Qualität wird aber nicht immer gewährleistet. Durch wiederholte Läufe des Programms kann die Wahrscheinlichkeit, eine gute Lösung zu finden, erhöht werden. Weiterhin ist anzumerken, dass die ausgegebenen Lösungen nicht direkt im Praxis verwendet werden sollten. Die Kontrolle und Überarbeitung durch Experten sind unabdingbar. Die Algorithmen können jedoch einen guten Ausgangspunkt dazu anbieten.

In der Zukunft kann eine graphische Benutzeroberfläche entwickelt werden, damit die Anwender auch ohne Vorkenntnisse in EA das Programm bedienen können. Weiterhin soll eine Schnittstelle zur BIM Software geschaffen werden, um die geometrische und semantische Projektdaten aus BIM Software automatisch ins BOS und die Ergebnisse aus BOS in die BIM-Programme zu übertragen.

Literatur

- DRIRA, A., PIERREVAL, H., & HAJRI-GABOUJ, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2007.04.001>
- EASA SAID M., & HOSSAIN K. M. A. (2008). New Mathematical Optimization Model for Construction Site Layout. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(8), 653–662. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:8\(653\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:8(653))
- ELBELTAGI EMAD, HEGAZY TAREK, & ELDOSOUKY ADEL. (2004). Dynamic Layout of Construction Temporary Facilities Considering Safety. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(4), 534–541. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:4\(534\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:4(534))
- KRUSE, R., BORGELT, C., BRAUNE, C., KLAUWONN, F., MOEWES, C., & STEINBRECHER, M. (2015). *Computational Intelligence: Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze* (2nd ed.). Springer Vieweg. Retrieved from <http://www.springer.com/de/book/9783658109035>
- LI, H., & LOVE, P. E. . (2000). Genetic search for solving construction site-level unequal-area facility layout problems. *Automation in Construction*, 9(2), 217–226. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(99\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(99)00006-0)
- LIGGETT, R. S. (2000). Automated facilities layout: past, present and future. *Automation in Construction*, 9(2), 197–215. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(99\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(99)00005-9)
- MAWDESLEY, M. J., & AL-JIBOURI, S. H. (2003). Proposed genetic algorithms for construction site layout. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(5), 501–509. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2003.09.002>
- MAWDESLEY MICHAEL J., AL-JIBOURI SAAD H., & YANG HONGBO. (2002). Genetic Algorithms for Construction Site Layout in Project Planning. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(5), 418–426. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:5\(418\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:5(418))
- MELLER, R. D., & GAU, K.-Y. (1996). The facility layout problem: Recent and emerging trends and perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(5), 351–366. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(96\)84198-7](https://doi.org/10.1016/0278-6125(96)84198-7)
- SADEGHPOUR, F., & ANDAYESH, M. (2015). The constructs of site layout modeling: an overview. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(3), 199–212. <https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0303>
- SCHACH, R., & OTTO, J. (2011). *Baustelleneinrichtung: Grundlagen - Planung - Praxishinweise - Vorschriften und Regeln* (2nd ed.). Vieweg+Teubner Verlag. Retrieved from <http://www.springer.com/de/book/9783834881120>
- WEICKER, K. (2015). *Evolutionäre Algorithmen* (3., überarb. u. erw. Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg.

Simulationsumgebung zur Evaluation von umweltorientierten Verkehrsmanagement-Strategien

Marco Fedior¹ und Wido Hamel²

Professur Verkehrssystemplanung · Bauhaus-Universität Weimar · Marienstraße 13d · 99423 Weimar

¹E-Mail: marco.fedior@uni-weimar.de

²E-Mail: wido.hamel@uni-weimar.de

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Problematik bei der Prognose verkehrsbedingter Schadstoff-Immissionen. Im Mittelpunkt steht die Entwicklung und der Aufbau einer Simulationsumgebung zur Evaluation von umweltorientierten Verkehrsmanagement-Strategien. Die Simulationsumgebung wird über die drei Felder Verkehr, Emission, Immission entwickelt und findet zunächst Anwendung in der Evaluation verkehrlicher Maßnahmen für die Friedberger Landstraße in Frankfurt am Main.

Keywords: UVM, Luftschadstoff, Emissionsmodellierung, Verkehrsmodellierung

1 Schadstoffproblematik

1.1 Grundlagen

Die Luftverschmutzung hat weltweit einen großen Einfluss auf die physische und mentale Gesundheit. Dieser Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang ist schon seit langem bekannt und durch zahlreiche Untersuchungen belegt. Die direkten Folgen für den Menschen liegen in negativen Effekten auf Sterblichkeit, Atemwegs- und Herz-Kreislaufferkrankungen (DORA & PHILLIPS 2000).

Für den menschlichen Organismus sind Konzentration der Schadstoffe und Dauer der Aussetzung von entscheidender Bedeutung (WHO, 1999). Aus diesem Grund werden durch die Luftqualitätsrichtlinie der EU für eine Reihe von üblichen Schadstoffen Grenzwerte festgelegt. Mit dem Erlass der 39. Bundes-Immissionsschutzverordnungen (BImSchV) sind diese in Deutschland einzuhalten. Die WHO empfiehlt teilweise noch deutlich niedrigere Grenzwerte ohne zulässige Überschreitungen. Seit August 2010 gelten für die wichtigsten Schadstoffe NO_2 und PM folgende Grenzwerte in Deutschland (Siehe Tabelle 1):

Tabelle 1: Grenzwerte für Luftschadstoffe in Deutschland

	<i>Jahresmittel</i>	<i>Stundenmittel (NO_2) / Tagesmittel (PM_{10})</i>
<i>Stickstoffdioxid, NO_2</i>	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (18 h Überschreitung/Jahr erlaubt)
<i>Feinstaub PM_{10}</i>	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (35 T Überschreitung/Jahr erlaubt)
<i>Feinstaub $PM_{2,5}$</i>	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-

Noch vor Industrie und Energieerzeugung ist Verkehr der größte Emittent an Luftschadstoffen. In Deutschland überschreiten ca. 46 Prozent der verkehrsnahen Messstationen den NO_2 -Jahresmittelwert (UBA, UMWELTBUNDESAMT 2018). Gerade in den Ballungszentren mit hohem Verkehrsaufkommen sind Menschen verstärkt Gefahren ausgesetzt, da hier Luftverschmutzungen in hohen Konzentrationen auftreten können. Die größten Schadstoffbelastungen treten dort auf, wo hohe Verkehrsbelastung in Verbindung mit schlechten Luft-Austauschbedingungen vorherrschen. Da die Austauschbedingungen nicht oder nur mit größtem Aufwand verbessert werden können, konzentrieren sich die Vorschläge zur Verbesserung der Luftqualität auf Maßnahmen des motorisierten Verkehrs.

1.2 Umweltorientierte Verkehrsmanagement-Strategien

Die Emission von Luftschadstoffen im Verkehr ist von vielen Faktoren abhängig. Neben der Antriebstechnologie spielen vor allem die Fahrweise, Topografie, Verkehrssteuerung und die Verkehrsmenge eine wichtige Rolle. Maßnahmen der umweltorientierten Verkehrsplanung liegen in der Vermeidung von Verkehr, der Verlagerung von Verkehr auf umweltfreundliche Verkehrsträger und in der umweltgerechten Gestaltung von Verkehrsabläufen. Zum Beispiel durch umweltorientiertes Verkehrsmanagement (UVM). Das UVM ist eine Ansammlung an Maßnahmen des Verkehrsmanagements mit dem Ziel verkehrsbedingte Emissionen zu reduzieren. Zu Maßnahmen des UVM zählen (FGSV 2014):

- Lokale Fahrverbote für Lkw oder Diesel-Pkw (Hauptemittenten von Stickoxiden)
- Umlenkungen von Verkehrsströmen auf weniger belastete Strecken
- Zuflusdosierung durch Reduzierung der Freigabezeiten an Lichtsignalanlagen
- Verflüssigung der Verkehrsströme durch Koordinierung der Lichtsignalanlagen
- Geschwindigkeitsanpassungen durch Wechselverkehrszeichen

Eine genaue Vorhersage der Wirkungsstärke eines Maßnahmenbündels auf den Verkehrsablauf und hin zu einer Einhaltung von Immissions-Grenzwerten ist äußerst komplex.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Strategiewechsel durch Open Data orientierte Lösungen – School“ wird an der Bauhaus-Universität Weimar ein Evaluations-Framework entwickelt. Von der Modellierung und Simulation des Verkehrs, über die Berechnung der fahrzeugbedingten Emissionen, bis hin zur Berücksichtigung der Schadstoffausbreitung anhand von Topografie und Klimadaten soll eine Wirkungsermittlung für geplante Maßnahmen möglich werden.

2 Simulationsumgebung

2.1 Modell

Die Wirkungsermittlung verkehrlicher Maßnahmen auf die Schadstoff-Immission erfolgt durch Verknüpfung der Simulationsfelder Verkehr, Emission und Immission. Mit Hilfe des Fahrzeugfolgmodells im Programm „PTV VISSIM“ wird die Verkehrssituation nachgebildet. Die Berechnung der Emissionen erfolgt dann auf Grundlage eines Abgas-Emissionsmodells mit dem Berechnungstool „TNO EnViVer“. Für die zukünftige Simulation und Berechnung der Immissionen ist die Berechnung mit einem Ausbreitungsmodell, zum Beispiel „Lohmeyer ProFet“, geplant.

In einer ersten praktischen Anwendung wurden an der Bauhaus-Universität Weimar für das Forschungsvorhaben „School“ einige UVM-Maßnahmen für die Friedberger Landstraße in Frankfurt a. M. evaluiert. Der Untersuchungsbereich erstreckt sich zunächst auf 520 m und über drei große Knotenpunkte. Die Signalprogramme der Knotenpunkte wurden erfasst und mit VISSIM nachmodelliert. Die Straße besitzt auf zwei getrennten Richtungsfahrbahnen durchgängig jeweils mindestens 2 Fahrstreifen. Zudem liegen neben den Fahrstreifen zwei Straßenbahngleise, die ebenfalls in der Simulation berücksichtigt wurden. Als Datengrundlage für die Verkehrssimulation wurde eine Verkehrszählung durchgeführt und eine durchschnittliche Verkehrsstärke (Bemessungsverkehrsstärke = 1689 Kfz/h) ermittelt.

Für die Friedberger Landstraße wurden die Verkehrs-Szenarien „Pro MIV“, „Pro ÖPNV“ und eine Nullvariante entwickelt und ihre Wirkung simuliert. Das Szenario „Pro MIV“ besteht aus einem Maßnahmenbündel zur Verkehrsverflüssigung (Angepasste Freigabezeiten, Grüne Welle) und einer prognostizierten Zunahme der Anteile an Hybrid-, Elektro- und Wasserstofffahrzeugen. Das Szenario „Pro ÖPNV“ beruht auf einem Maßnahmenbündel aus restriktiven Maßnahmen für Kraftfahrzeuge (Dieselfahrverbote, Zufluss-Dosierung) und Fördermaßnahmen für den ÖPNV (kostenloser ÖPNV, erhöhte Taktrate, Priorisierung an Knotenpunkten). Die Nullvariante bildet den aktuellen Stand ohne verkehrstechnische Änderungen ab.

2.2 Mikroskopische Verkehrsfluss-Simulation

In der mikroskopischen Verkehrsfluss-Simulation wird das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer nachgebildet. Dieses Fahrverhalten bezieht sich auf die folgenden drei Ebenen:

- Strategisches Fahrverhalten (Routenwahl).
- Taktisches Fahrverhalten (Überholen, Einordnen, Einfädeln)
- operationales Fahrverhalten (Lenken, Bremsen, Beschleunigen)

Die Modellierung des strategischen Fahrverhaltens erfolgt je nach verfügbarer Datengrundlage auf Basis von statischen Routen bzw. Abbiegeanteilen an Knotenpunkten oder dynamischen Umlegungen mittels Quelle-Ziel-Matrix. Auf der taktischen Ebene werden Fahrmanöver auf Grundlage von räumlich erkennbaren und in der Umgebung wahrnehmbaren Merkmalen nachgebildet. Entscheidungsgrundlage für taktisches Fahrverhalten sind zum Beispiel Raum- und Zeitlücken im Verkehrsstrom.

Die Grundlage zur Simulation des operationalen Fahrerverhaltens ist eine angepasste Version des Fahrzeugfolgemodells von Wiedemann (WIEDEMANN 1974). Der Fahrer trifft seine Entscheidungen an Hand von Wahrnehmungsschwellen in Abhängigkeit von Geschwindigkeitsdifferenz und Entfernung zum vorherfahrenden Fahrzeug (FELLENDORF 1994).

Im Ergebnis der mikroskopischen Verkehrsfluss-Simulation stehen Fahrzeugprotokolldaten (ZFP-Dateien), die eine Auswertung der Simulation hinsichtlich Verkehrsablauf ermöglichen. In den ZFP-Dateien werden Bewegungsabläufe der einzelnen Fahrzeuge im Sekundentakt protokolliert und Kenngrößen wie Reisezeit, Standzeit, Verlustzeit, Anzahl der Halte sowie Geschwindigkeit aufgezeichnet.

In Bezug auf die Simulation der Friedberger Landstraße ergeben die Fahrzeugprotokolldaten eine Bewertungsbasis, anhand derer die positiven Auswirkungen der beiden Szenarien „Pro MIV“ und „Pro ÖPNV“ auf den Verkehrsablauf bewertet und veranschaulicht werden können.

In beiden Szenarien sind Verbesserungen in den untersuchten Kenngrößen (Reisezeiten, Rückstaulängen etc.) festzustellen. Die geringere Fahrzeugzahl im Szenario „Pro ÖPNV“ wirkt deutlich besser auf die Verkehrsqualität, als die Verflüssigungsmaßnahmen aus dem Szenario „Pro MIV“.

2.3 Emissions-Simulation

Der Berechnung der verkehrsbedingten Emissionen liegt das mikroskopische Abgas - Emissionsmodell VERSIT+ der Niederländischen „Organisation für angewandte wissenschaftliche Forschung – TNO“ der Universität Delft zugrunde. Es beruht auf Messungen mit rund 2.800 unterschiedlichen Fahrzeugen in spezifischen Fahrsituationen.

Für die zu modellierende Situation wird eine typische Fahrzeugzusammensetzung mit unterschiedlichen Antriebstechnologien, Verbräuchen und Schadstoffklassen bestimmt. Die verschiedenen Streckensituationen (Steigung, Eben, Gefälle) und Fahrsituationen (Fahren, Bremsen, Halten, Beschleunigen) werden mit spezifischen Emissionsausstößen aus einem Datenpool hinterlegt und entsprechend der Fahrverläufe aus der ZFP-Datei im Koordinatensystem verortet. Mit der Simulationsumgebung sind Berechnungen und Analysen der Emissionsentwicklungen für die Schadstoffe NO_x , PM_{10} sowie CO_2 möglich.

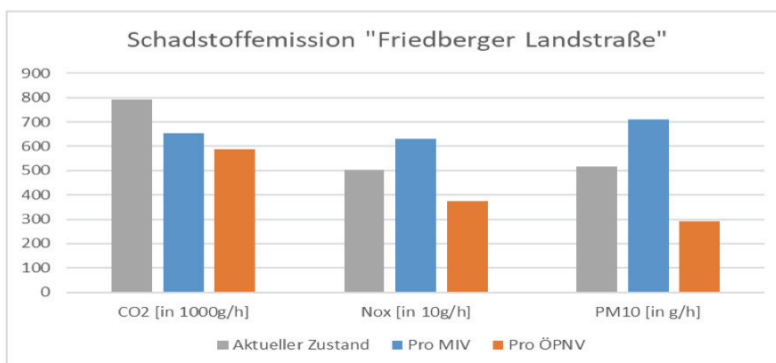


Abb. 1: Simulierte Schadstoff-Emissionen für die Friedberger Landstraße

Für die Szenarien in der Friedberger Landstraße wurde eine Auswertung der gesamten Emissionen auf der Netzebene durchgeführt. Im Ergebnis zeigt sich, dass eine Verbesserung der Verkehrsqualität nicht mit einer Verbesserung der Umweltsituation gleichzusetzen ist. Bei den Feinstaub- und Stickoxidwerten tritt im Szenario „Pro MIV“ sogar eine Verschlechterung der Ausgangslage ein. Im Szenario „Pro ÖPNV“ werden ausschließlich positive Effekte auf die Luftverschmutzung deutlich (Siehe Abbildung 1).

Die Auswertung der räumlichen Emissionsverteilung lässt weitere Rückschlüsse auf die Wirkungen des UVM oder einzelner Maßnahmen zu. Mit einer GIS-Visualisierung können Hot-Spots erkannt und Ursachen auf der Ebene der Verkehrsabläufe identifiziert und gegebenenfalls zusätzliche Maßnahmen getroffen werden. (Siehe Abbildung 2)

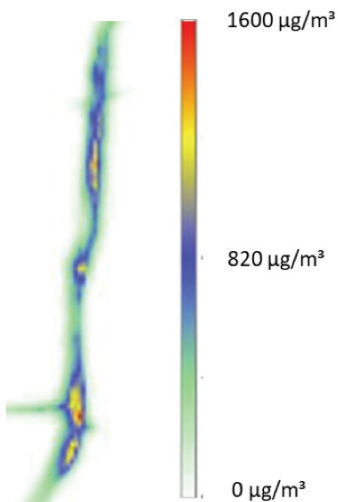


Abb. 2:
Simulationsergebnis für NO_x – Konzentrationen entlang der Friedberger Landstraße

2.4 Immissions-Simulation (Ausblick)

Damit drohende Grenzwertüberschreitungen erkannt und die Maßnahmen des Verkehrsmanagements hinsichtlich ihrer Wirkung auf Grenzwertüberschreitungen bewertet werden können, soll das Evaluationsframework im nächsten Schritt um das Simulationsfeld der Schadstoffausbreitung erweitert werden. Aus dem örtlichen und zeitlichen Verlauf der verkehrsbedingten Emissionen kann die örtliche Immission unter Berücksichtigung städtischer und ländliche Hintergrundbelastung über das Ausbreitungsmodell berechnet werden.

Die Topografie der Umgebung und die Randbebauung der Straße haben großen Einfluss auf die Austauschbedingungen der Luft. Für die Immissionsberechnung mit Hilfe von Ausbreitungsmodellen muss die direkte Umgebung nachmodelliert werden. Außerdem werden meteorologische Daten wie Temperatur, Niederschlag, Inversion und Windgeschwindigkeit, sowie die gemessene Feinstaubkonzentration als Hintergrundbelastung in das Ausbreitungsmodell eingerechnet. Als Basis sollen Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Verwendung finden.

Die Validation der Simulationsergebnisse kann über Luftmessstationen erfolgen. In der Friedberger Landstraße werden an einer verkehrsnahen Messstation Schadstoffmessungen durchgeführt. Für die Bemessung der städtischen Hintergrundbelastung können Messdaten aus Frankfurt Ost und für die ländliche Hintergrundbelastung aus Riedstadt berücksichtigt werden.

3 Fazit

Die kurzfristige Einhaltung der Grenzwerte für Luftschadstoffe erfordert in Deutschland verkehrliche Maßnahmen, die für manche Verkehrsteilnehmer restriktiv wirken. Um solche Maßnahmen gezielt und dosiert einsetzen zu können ist die Prognose der Wirkungsstärke auf die Immissionen von elementarer Bedeutung. Eine Simulationsumgebung über die drei Simulationsfelder Verkehr, Emission und Immission ist eine vielversprechende Grundlage. Die Simulationsumgebung wird im Rahmen der Forschungsarbeit an der Bauhaus-Universität stetig weiterentwickelt und verfeinert.

Literatur

- DORA, C. & PHILLIPS, M. (2000), Transport, environment and health - WHO Regional publications European series, No. 89. copenhagen.
- FELLENDORF, M. VISSIM: A Microscopic Simulation Tool to Evaluate Actuated Signal Control including Bus Priorityin, 64th Institute of Transportation Engineers Annual Meeting Oktober 1994: 1-9.
- FGSV. (2014), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Wirkung von Maßnahmen zur Umweltentlastung - Teil 3. Köln.
- UBA. (2018), Umweltbundesamt. Luftqualität 2017, Vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau: www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2017.
- WHO. (1999), Urban traffic pollution. London / New York.
- WIEDEMANN, R. (1974), Simulation des Verkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität (TH) Karlsruhe, Nr. 8.

Session 9:

Optimierung

Optimal sensor placement under consideration of different measurement error types

Ina Reichert

Graduiertenkolleg 1462 · Bauhaus-Universität Weimar · Marienstraße 7A · 99423 Weimar ·
E-Mail: ina.reichert@uni-weimar.de

In present times the number of so-called smart buildings is increasingly growing. Also, many other civil engineering structures (e. g. bridges) need to be refurbished, because their predicted lifespan has been exceeded. These and other factors lead to an increase in structural (health) monitoring systems, which involves a lot of expensive measurement equipment as well as data storage and processing over a long time. Due to cost savings and also avoiding unnecessary data it is wise to use a sufficient but small number of sensors. Moreover it is required to take the measurements at the most important locations to capture the whole structure and its behavior. For finding the optimal sensor positions it is reasonable to deploy optimal design of experiments approaches.

This paper investigates the optimal sensor positions using the Fisher information matrix and the mean-squared error as optimality approaches. The application example is a numerical model of a cantilever beam. Additionally, random measurement errors also in combination with systematic errors are considered. Conclusively, the two approaches for the optimal design are compared for the different measurement error descriptions.

Keywords: Design of Experiments, Fisher information matrix, Mean-squared errors, Random and systematic errors

1 Types of measurement errors

There are various sources for errors in measurements (JCGM/WG 1: GUM 2008, TRÄNKLER & REINDL 2015). In general, they can be divided in the groups of random (aleatoric) and systematic (epistemic) errors. In the following both types are going to be considered. A comprehensive description of the total error δ_i in measurements is given by $\delta_i = \beta_i + \varepsilon_i$ (COLEMAN & STEELE 1989), where β_i is the systematic error and ε_i is the random error. Hence, a fictitious measurement time history u is generated by adding the measurement noise to the “exact” solution y :

$$u(\mathcal{x}^j, t_i) = y(\mathcal{x}^j, t_i) + \delta_i, \quad (1)$$

Where \mathcal{x}^j represents the discrete spatial domain, which denotes the j -th sensor position and t_i is the temporal domain with i points.

Further on, the random error in Eq. 1 will be considered to be normally distributed $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ with zero mean and variance σ^2 . For the systematic error two descriptions are applied. The first one is relative to the “exact” solution y and the second one is a drift over time. These result in three error descriptions:

- Random error: $u^{rand}(x^j, t_i) = y(x^j, t_i) + \varepsilon_i$,
- Random and systematic relative error: $u^{rel}(x^j, t_i) = (1 + \beta^{rel}) \cdot y(x^j, t_i) + \varepsilon_i$,
- Random and systematic drift error: $u^{drift}(x^j, t_i) = y(x^j, t_i) + \beta^{drift} \cdot t_i + \varepsilon_i$,

where β^{rel} is the factor for the systematic relative error and β^{drift} stands for the systematic drift factor that is multiplied with each time step t_i . The applied values for the different errors are displayed in Table 1.

Table 1: Error factors for the different error descriptions for each error description number e , where ε_i is the random error, β^{rel} is the systematic relative factor and β^{drift} is the level of drift

e	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ε_i	0,10	0,25	0,50	1,00	0,10	0,25	0,50	1,00	0,10	0,25	0,50	1,00	0,10	0,25	0,50	1,00
β^{rel}	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10

e	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
ε_i	0,10	0,25	0,50	1,00	0,10	0,25	0,50	1,00	0,10	0,25	0,50	1,00
β^{drift}	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00

2 Methods

2.1 Fisher Information Matrix (FIM)

A probabilistic definition of the sensor placement is reached by using the Cramér-Rao inequality as the Fisher Information Matrix (FIM) is a lower bound of the covariance matrix (BANDEMER & BELLMANN 1994, UCIŃSKI 2005). As long as the errors are spatially uncorrelated, the FIM can be calculated with

$$M = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^{n^{sens}} \sum_{t=1}^{n^t} \left(\frac{\partial \mathbf{u}(\boldsymbol{\theta}, x^j t_i)}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{u}(\boldsymbol{\theta}, x^j t_i)}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T \quad (2)$$

where \mathbf{u} solves the forward problem and $\boldsymbol{\theta}$ represents the parameters of interest. In addition, x is the spatial domain, t is the temporal one, n^{sens} is the number of sensors, n^t denotes the number of time-steps and σ is the standard deviation, which is constant for all measurement locations. In literature many optimality criteria exist to evaluate and compare the FIM. Further on, the D-optimality

$$J_{FIM}(\mathbf{M}) = \det(\mathbf{M}^{-1}) \quad (3)$$

is used on Eq. (2), because it is independent of the scaling of the parameter, i.e. units (GOODWIN & PAYNE 1977).

2.2 Mean-squared error (MSE)

The aim of using the concept of mean-squared errors is to minimize the difference between the measurement corrupted by noise \mathbf{u} and the “exact” solution \mathbf{y} for certain sensor position combinations \mathbf{x} , where the parameters of interest $\boldsymbol{\theta}$ depend on \mathbf{x} (BARDOW 2006, LAHMER 2011). The associated cost function is

$$\min_{\hat{\boldsymbol{\theta}}} J(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \mathbf{x}) = \min_{\hat{\boldsymbol{\theta}}} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n'} \left(\mathbf{y}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, x^j, t_i) - \mathbf{u}(\boldsymbol{\theta}, x^j, t_i) \right)^2, \quad (4)$$

where the estimated vector of parameters $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ needs an initial guess, x^j is the j -th entry of \mathbf{x} that contains all sensor positions. For this approach, the number of sensors needs to be greater or equal to the number of unknown parameters. For applying statistical rules, the calculation of the MSE needs to be repeated k -times, i.e. $k = 1.000$. For finding the optimal sensor placement two ways can be applied. Firstly, the difference between the mean estimated parameters $\bar{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{\boldsymbol{\theta}}_i(\mathbf{x})$ and the exact one $\boldsymbol{\theta}$ is minimized by

$$\min_{\mathbf{x}} J_1(\bar{\boldsymbol{\theta}}, \mathbf{x}) = \min_{\mathbf{x}} \|\bar{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\theta}(\mathbf{x})\|^2 \quad \text{or} \quad (5)$$

the empirical covariance matrix is calculated by

$$\mathbf{C} = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \left(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i(\mathbf{x}) - \bar{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{x}) \right) \left(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i(\mathbf{x}) - \bar{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{x}) \right)^T \quad \text{and} \quad (6)$$

the usage of an optimality criterion (SCHENKENDORF 2009). Again, the D-optimality

$$J_{MSE}(\mathbf{M}) = \det(\mathbf{C}) \quad (7)$$

is used for reasons of comparison with the FIM approach.

3 Application

A cantilever beam serves as the application example. The beam is a hollow circular pipe, which possesses two different Young's moduli over the length as depicted in Fig. 1. The geometrical and material properties are summarized in Fig. 1 as well. A Bernoulli beam model with 12 elements is used for the numerical calculation, s.t. four elements belong to the lower part and eight to the upper one. For excitation purposes a harmonic load with the 6th eigenfrequency is applied to all nodes of the finite element model.

The acceleration time histories are used as measurement data after being corrupted with any of the error descriptions as depicted in Table 1. The vector of the parameters of interest $\boldsymbol{\theta}$ consists of the two Young's moduli E_1 and E_2 . For each error description the optimization process is repeated $k = 1.000$ times for all 220 possible sensor setups. These setups result from combinatorial considerations, when three out of 12 positions are used per setup.

For assessing the optimal sensor placement the FIM and MSE approaches following the Eq. 3 and Eq. 7, respectively, are used. The optimization process is executed by using the Nelder-Mead method, cf. (NELDER & MEAD 1965).

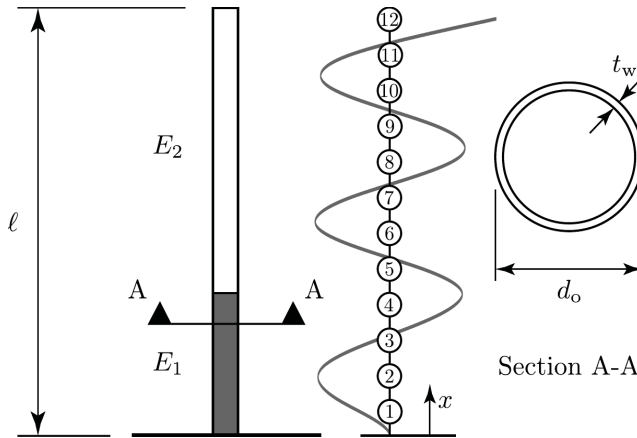


Fig. 1: Sketch of the cantilever beam and its geometry, 12 possible discrete sensor positions, 6th mode shape (gray line) and cross section A-A with $l = 2,88$ m; $t_w = 2,7$ mm; $d_o = 11,0$ cm; $E_1 = 5,25 \cdot 10^9$ N/m²; $E_2 = 3,50 \cdot 10^9$ N/m²; $\rho = 1390$ kg/m³

4 Results

The DoE calculations result in a variety of optimal sensor setups according to their respective error description and the applied method. Exemplarily, the best, second best and third best setups are displayed in Fig. 2 for the FIM approach (column M) and the MSE approach for each of the 28 error descriptions denoted by error index.

The results for FIM and MSE already show a difference if there is only random noise. Considering the FIM approach and only random noise the best setup is {4, 6, 12}. For the MSE, on the other hand, the best setups are {6, 8, 12}, {7, 8, 12} or {8, 10, 12} depending on the noise level. Also, there is no coherence to be seen within one error description between the increasing noise levels. The best setups are more or less independent of the level if noise.

It can be observed that for the three best setups in Fig. 2(c) over all error descriptions for the MSE approach 97 % of the sensor locations are at position 5 or higher. The most recommended positions are {8} and {12} with 93 % and 74 % of usage, respectively. Followed by the positions {9}, {10}, and {11} with circa 30 % of usage each. Again, a trend towards higher positions can be seen.

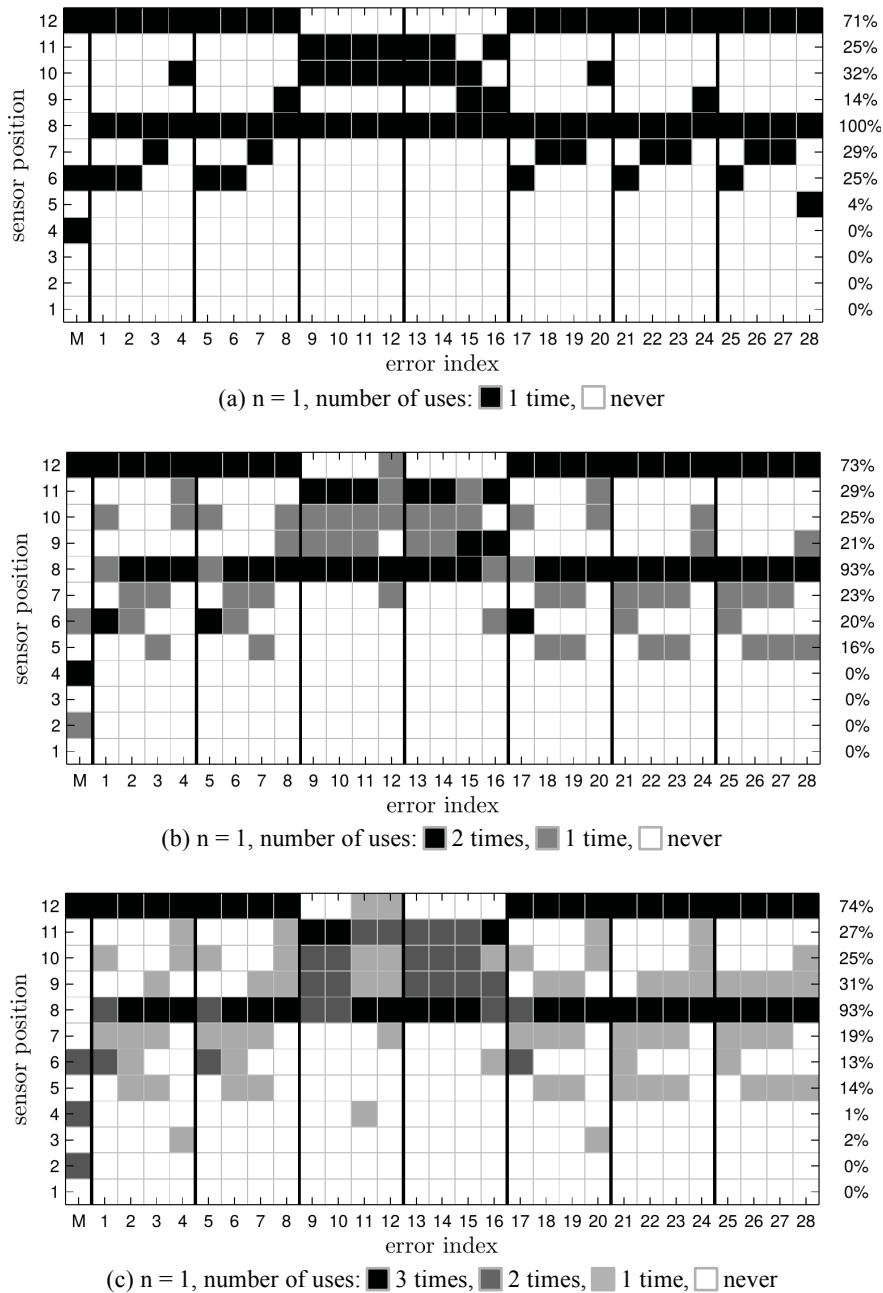


Fig. 2: Usage of each sensor position within the best $n = 1$ to 3 setups for FIM (column M; Eq. (3)), for the MSE (Eq. (7)) per error description (error index 1 to 28, Table 1) and the average use in % over all error descriptions for using MSE

5 Discussion and conclusion

First of all, the results point out that there is a difference between the FIM and the MSE approach concerning the optimal experimental design, i.e. the best sensor setups. Regarding the fact that the method using the FIM can only take random errors and the MSE method is able to consider random and systematic errors, this outcome is inherent to the methods. For both approaches it is not necessary to know the “exact” solution. Therefore, both of the methods can be applied for real world measurements. As to that, Fig. 2 also gives advice if the best setup cannot be realized, e.g. due to limited access of the structure. In such case, the experimenter can choose the second or third best design if applicable.

Noticeable is also that the MSE approach with using the D-optimality criteria tends to put sensors at the higher locations. This behavior is explained by the signal-to-noise ratio. Since the amplitudes of the signal are higher at the upper part of the cantilever beam also the signal-to-noise ratio is higher and leads to a better recognition of the measurement data itself. A possible disadvantage of this clustering behavior might be that there is less information about the lower part of the beam that has a higher Young’s modulus E_1 , which might not be identified as good as the other one (E_2).

As the optimal experimental setups vary by the error description (and noise level) it makes it necessary to investigate the expected errors beforehand in order to choose the best setup for the measurement problem at hand.

Another important aspect is the computational time. The calculation of the optimal design using the FIM approach is done very fast in a few seconds. For the MSE approach, on the other hand, $k = 1.000$ repetitions are made for each optimization of the 220 possible sensor location combinations. Even with the use of a computer cluster the computations take weeks. Therefore, the exhaustive search needs to be minimized by certain existing algorithms, e.g. branch & bound algorithm.

Additionally, the shown methods are still to be validated on real structures like broadcasting towers or wind turbines. Many more restrictions need to be accounted for in full-scale measurements, since the accessibility in time and space is regulated by the operator and owner of the structure.

Acknowledgments

Financial support for this work was provided by the German Research Foundation (DFG), within the Research Training Group 1462. This support is gratefully acknowledged.

Literature

- BANDEMER, H. & BELLMANN, A. (1994), *Statistische Versuchsplanung*, BG Teubner.
- BARDOW, A. (2006), Optimal experimental design for ill-posed problems, In: 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering, pp. 173–178. Elsevier, Amsterdam.
- COLEMAN, H. & STEELE JR, W. (1989), *Experimentation and uncertainty analysis for engineers*, John Wiley and Sons.
- GOODWIN, G. C. & PAYNE, R. L. (1977), *Dynamic system identification: experiment design and data analysis*, Academic press.
- JCGM/WG 1: GUM (2008), Evaluation of measurement data - guide to the expression of uncertainty in measurement. Tech. rep., Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology.
- LAHMER, T. (2011), Optimal experimental design for nonlinear ill-posed problems applied to gravity dams. *Inverse Problems* 27(12), 125005.
- NELDER, J. A. & MEAD, R. (1965), A simplex method for function minimization. *The computer journal* 7(4), 308–313.
- SCHENKENDORF, R., KREMLING, A. & MANGOLD, M. (2009), Optimal experimental design with the sigma point method. *IET systems biology* 3(1), 10–23.
- TRÄNKLER, H. R. & REINDL, L. M. (2015), *Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft*, Springer-Verlag.
- UCIŃSKI, D. (2005), *Optimal measurement methods for distributed parameter system identification*, CRC Press.

Optimierungsverfahren zur Kalibrierung Typologie-basierter energetischer Gebäudemodelle

André Hoffmann

Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen · Technische Universität Darmstadt ·
Franziska-Braun-Straße 7 · 64287 Darmstadt ·
E-Mail: hoffmann@iib.tu-darmstadt.de

Möchte man den Energieverbrauch eines Gebäudes simulieren, müssen zuvor Geometrie, Wetterdaten, Materialeigenschaften, Heizverhalten der Nutzer und viele weitere Informationen erfasst, aufbereitet und digitalisiert werden. Fehlende Angaben können durch statistisch fundierte Annahmen ersetzt werden. Allerdings ist fraglich, ob mit dem resultierenden Gebäudemodell noch Simulationen durchgeführt werden können, welche die Realität nah genug abbilden. Eine Möglichkeit die Qualität eines Modells zu bemessen ist es, die durch Simulation gewonnen Werte des Energieverbrauchs mit real gemessenen Werten (zum Beispiel von Smart Metern) zu vergleichen. Hat man eine Aussage über die Qualität des Modells, so auch über die Qualität der Daten, aus denen sich das Modell speist. Verändert man nun die Daten des Modells, führt erneut eine Simulation mit dem geänderten Modell aus und stellt wieder simulierte und realen Daten einander gegenüber, so wird man im Vergleich zum vorherigen Durchgang eine Verbesserung oder Verminderung der Qualität des Modells feststellen. Durch mehrfache Wiederholung dieses Vorgangs können die Modelldaten systematisch verbessert werden. Mathematisch spricht man hierbei von einem Optimierungsproblem. Der Beitrag legt die theoretischen Grundlagen zweier Lösungsverfahren für ein solches Problem dar: Evolutionäre Algorithmen und Simulated Annealing. Auf Grundlage dieser Algorithmen wurde ein Softwaremodul zur Kalibrierung der Eingangsdaten der Simulationssoftware EnergyPlus entwickelt. Um den Einfluss von Datenerhebungsfehlern und die Ungenauigkeit der Simulationssoftware zunächst auszuschließen, wurde anstelle von Smart-Meter-Daten ein zweiter Simulationsdatensatz verwendet. Unter diesen Testbedingungen war eine Verbesserung der Startkonfiguration mit beiden Algorithmen möglich. Der evolutionäre Algorithmus fand in einigen Durchläufen auch die Konfiguration, mit welcher der zweite Simulationsdatensatz erstellt wurde.

Keywords: Simulation und Modellierung, Optimierung, Kalibrierung

1 Grundlagen

1.1 Einführung

Eingangsdaten von Simulationsmodellen sind häufig mit Ungenauigkeiten behaftet oder erst gar nicht zu ermitteln. Liegen gewünschte Ergebnisse der Simulation bereits vor, etwa in Form von gemessenen Daten, so ist es erstrebenswert mit diesen eine Anpassung der Eingangsdaten des Simulationsmodells vorzunehmen. Ziel ist es, dass das veränderte Modell möglichst genau die vorhandenen Wunschergebnisse wiedergibt und, dass durch diesen Anpassungsvorgang auch die Eingangsdaten des Modells präziser werden. Diese Aufgabenstellung lässt sich als nichtlineares Optimierungsproblem formulieren. Da die Komplexität vieler Simulationsmodelle eine vollständige Abdeckung des Lösungsraums nicht zulässt, muss auf

heuristische Optimierungsalgorithmen zur Lösung dieses Problems zurückgegriffen werden. Setzt man heuristische Verfahren ein, so verzichtet man allerdings auf die Garantie das globale Optimum zu finden. Für diesen Beitrag wurden zwei heuristische Optimierungsverfahren verwendet: Simuliertes Abkühlen und Evolutionäre Algorithmen. Diese Optimierungsverfahren sind universell einsetzbar sind. Alles, was benötigt wird, ist eine Möglichkeit die Zielfunktion für alle Punkte des Lösungsraums auszuwerten.

1.2 Simuliertes Abkühlen

Simuliertes Abkühlen ist ein Optimierungsverfahren, welches auf der Analogie des physikalischen Vorgangs des Abkühlens eines Festkörpers und der schrittweisen Verbesserung einer Konfiguration im Lösungsraum basiert. Die Lösungen x des Optimierungsproblems sind äquivalent zu den Zuständen des physikalischen Systems (AARTS & KORST 1990, 15ff). Der Zielfunktionswert $f(x)$ ist äquivalent zur Energie eines Zustands. Die Rolle der Temperatur wird durch einen sogenannten Kontrollparameter c übernommen. Es wird vom energetischen Zustand x_i eines Festkörpers ausgegangen. Der nächste Zustand x_{i+1} wird dadurch generiert, dass ein Mechanismus angesetzt wird, der den vorherigen Zustand nur ein bisschen verändert (Transition). Ist die Energiedifferenz zwischen dem neuen Zustand und dem alten Zustand kleiner oder gleich 0, so wird der neue Zustand akzeptiert. Ist sie größer als 0, so wird der neue Zustand mit der Wahrscheinlichkeit $\exp\left(\frac{f(x_i)-f(x_{i+1})}{c}\right)$ akzeptiert. Führt man mehrere Transitionen aus, spricht man von einem stochastischen Prozess, genauer gesagt von einer Markow-Kette. Simulierten Abkühlen kann mathematisch als Sequenz von homogenen Markow-Ketten beschrieben werden (vgl. LAARHOVEN & AARTS 1987, S.9). Jeder der Ketten wird für einen fixen Wert von c generiert und c wird zwischen Ende und Anfang einer neuen Kette abgesenkt. Der Algorithmus akzeptiert stets Verbesserungen der Zielfunktion. Verschlechterungen werden ebenfalls akzeptiert, aber diese nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Bei großem c , also zu Beginn des Algorithmus, werden noch große Verschlechterungen akzeptiert. Mit sinkenden c sinkt auch die Wahrscheinlichkeit für die Akzeptanz einer hohen Verschlechterung bis bei $c = 0$ nur noch Verbesserungen akzeptiert werden.

1.3 Evolutionäre Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen Evolutionäre Algorithmen sind stochastische Suchverfahren, die an die Prinzipien der natürlichen Evolution angelehnt sind (POHLHEIM 2000, S.8). Eine Punktemenge wird dabei als Population von Lebewesen in einer künstlichen Umwelt angesehen. Der Grad der Anpassung an die Umwelt wird durch den Wert der Zielfunktion $f(x)$ bestimmt. Die Punkte x werden als Individuen und die einzelnen Koordinaten eines Punktes $[x]_k$ als Genome eines Individuums bezeichnet. Anhand dieser Analogie können verschiedene Mechanismen modelliert werden, welche im Verlauf der Evolution angewendet werden (SPRAVE 1999, S.10):

Reproduktion: Aus gegebenen Individuen wird ein Nachkomme generiert.

Mutation: Im Verlauf der Reproduktion wird durch kleine Veränderungen der Genome Variation erzeugt. Sie werden als Tastschritte der Natur bezeichnet. Analog hierzu erfolgen bei den evolutionären Algorithmen geringfügige Änderungen der Koordinatenwerte.

Selektion: Die bestangepassten Individuen überleben und bleiben in der Population. Die Bewertung des Anpassungsgrad erfolgt durch Auswertung der Zielfunktion. Diese wird entsprechend auch als fitness-Funktion bezeichnet.

Rekombination: Aus zwei oder mehreren Individuen werden zufällige Bruchstücke entnommen und zu neuen Individuen zusammengefügt.

Außerdem wird im Rahmen dieser Arbeit ein Populationskonzept gewählt, in welcher die Selektion auf getrennte Teile der Population angewandt werden. Diese werden Unterpopulationen genannt. Sie entwickeln sich unabhängig voneinander. In jeder der Unterpopulationen findet ein eigener evolutionärer Algorithmus statt. Nach einer bestimmten Isolationszeit (Iterationen des Algorithmus) findet ein Austausch von Individuen statt. Dieser Vorgang nennt sich Migration.

2 Optimierung energetischer Gebäudemodelle

2.1 Problemstellung

Auf Grundlage der evolutionären Algorithmen und des simulierten Abkühlens sind zwei Softwaremodule entstanden, welche eine Kalibrierung von Eingangsdaten eines energetischen Gebäudemodells vornehmen können. Zunächst wurde ein Energiemodell (EnergyPlus) ausgewählt. Dann mussten die Parameter ausgewählt werden, die kalibriert werden sollten. Beide Algorithmen benötigen außerdem eine Zielfunktion und eine Möglichkeit diese auszuwerten. Die Zielfunktion muss auf durch das zu kalibrierende Modell simulierten Daten und real gemessenen Daten basieren. Das Modul sollte mit Messdaten eines realen Hauses versorgt werden können, für welches ein digitales Gebäudemodell vorliegt. Das Softwaremodul benötigte ebenfalls eine Möglichkeit, das Modell zu verändern und eine energetische Simulation in den selben Zeitschritten wie die realen Daten auszuführen sowie anschließend die simulierten Daten auszulesen. Des Weiteren musste eine für das Problem passende Konfiguration der Algorithmen gewählt werden. Die Energieverbrauchsdaten der Gebäude wurden mit der Software EnergyPlus simuliert. Aufgrund der relativ hohen Zeitspanne (29.4 s), die für eine Modellauswertung benötigt wird, musste dabei auch auf die Parallelisierbarkeit der Algorithmen geachtet werden.

2.2 Zielfunktion und Parameter

Zunächst musste die Zielfunktion formuliert werden, welche zu optimieren ist. Wie im Kapitel Problemstellung angesprochen, sollen der zeitliche Verlauf des mit dem Smartmeter gemessenen Energieverbrauchs möglichst genau mit dem Verlauf der mit EnergyPlus simulierten Werte übereinstimmen. Dies stellt ein klassisches Problem der Ausgleichsrechnung dar und wird üblicherweise mit der Methode der kleinsten Quadrate gelöst. Hierbei wird die Summe der Fehlerquadrate minimiert:

$$\min \sum_{j=1}^n (f(x_j) - y_j)^2 \quad (1)$$

Wobei $f(x_j)$ den Werten der Modellkurve und y_j den gemessenen Werten entspricht. Für den Energieverbrauch $f(x_j)$ werden die Werte der Variable Boiler Gas Energy der eplu-

sout.eso-file von EnergyPlus entnommen. Es blieb zu definieren, welche Variablen $[x]_k$ optimiert werden sollen. Eine hohe Variablenzahl erhöht die Größe des Problemraums. Je größer der Problemraum, desto länger dauert auch die Suche nach einer geeigneten Lösung. Um die Erstellung und Analyse der Applikation mit den einhergehenden Testläufen in einen geeigneten zeitlichen Rahmen zu halten, sollte die Anzahl der Variablen daher begrenzt werden. Die folgenden 5 Parameter sollen die Charakteristika des Modells möglichst gut abbilden:

- $[x]_1$: U-Wert der Außenwände,
- $[x]_2$: U-Wert des Daches,
- $[x]_3$: U-Wert der Fenster,
- $[x]_4$: U-Wert der unteren Systemgrenze (Kellerdecke oder Bodenplatte),
- $[x]_5$: Heiztemperatur des Thermostats.

Eine spätere Erweiterung ist immer noch möglich. Die U-Werte verschiedener Wandaufbauten, Dächer, Fenster und Bodenplatten werden einer Datenbank entnommen. Sie sind somit diskret. Die Heiztemperatur wurde als reeller Parameter modelliert. Um den Problemraum einzuschränken wurde für die Testläufe davon ausgegangen, dass sie sich zeitlich nicht verändert. Da höhere Zahlenwerte intuitiv besser eingeschätzt werden können, werden die U-Werte beim Export aus der Datenbank in die amerikanische Einheit des R-Werts umgerechnet.

2.3 Konfiguration des simulierten Abkühlens

Aarts und Korst kommen bei einer Untersuchung zu dem Schluss, dass die sequentielle Natur des SA-Algorithmus ein Nachteil ist, der das Design eines massiv parallelisierten Algorithmus verhindert (AARTS & KORST 1990, S.114). Eine Teilparallelisierung kann erreicht werden in dem man mehrere Transitionen gleichzeitig berechnet (Clusteralgorithmus). Wird eine Transition durch das Akzeptanzkriterium abgewiesen, so kann direkt auf die vorher berechnete zugegriffen werden. Der Clusteralgorithmus beschleunigt den Algorithmus vor allem gegen Ende, wenn niedrige Werte des Kontrollparameters dafür sorgen, dass nur noch wenige Transitionen angenommen werden. Die Länge der Markovketten wurde so gewählt, dass die Rechenzeit des Gesamtprozesses etwa 7 Tage nicht überschreitet. Daher sollen die Ketten nach 200 erfolgreichen Transitionen abgebrochen werden. Da die Anzahl der angenommenen Transitionen mit sinkenden Kontrollparameter stark abnimmt, wird eine Kette spätestens nach 500 Transitionen abgebrochen. Die Übergangswahrscheinlichkeit, die Wahrscheinlichkeit von einem Zustand einen anderen Zustand auszuwählen, wurde wie vom Metropolisalgorithmus vorgegeben, symmetrisch gewählt. Also so, dass die Wahrscheinlichkeit von Punkt A zu Punkt B zu kommen, genauso hoch ist, wie von Punkt B zu A zu kommen. Ähnlich wie bei (HERMAN 2010, S.8) geschah dies indem für jeden Parameter unterschiedliche Schrittweiten festgelegt wurden. Bei jedem Übergang wird ein Parameter ausgewählt, der zufällig um eine Schrittweite abgesenkt oder verringert wird. Für die Schrittweiten der diskreten Variablen wird immer der nächsthöhere oder niedrigere Wert aus der Datenbank entnommen. Für den reellen Parameter T entspricht ein Schritt einer zufällig gewählten Zahl zwischen 0 und 1.

Pseudo-Code 1: Simuliertes Abkühlen

```

procedure SIMULATED ANNEALING(  $x_{Start}$ ,  $c_0$ )

     $x_i := x_{Start}$ 
     $c := c_0$ 
    while not (  $c \leq 0.1$ ) do
         $k := 0$ ;
         $a := 0$ ;
        while not (  $a \geq 200$  or  $k \geq 500$ ) do
            generiere ( $x_i$  from  $x_{i+1}$ )
            if  $f(x_{i+1}) \leq f(x_i)$  or  $\exp\left(\frac{(f(x_i) - f(x_{i+1}))}{c}\right) \geq \text{random}[0,1]$ 
            then
                 $x_i := x_{i+1}$ 
                 $a := a + 1$ 
            end if
             $k := k + 1$ ;
        end while
         $c := 0.9 * c$ ;
    end while

```

2.4 Konfiguration des evolutionären Algorithmus

Bei den evolutionären Algorithmen stellt sich die Parallelisierung recht einfach dar. So kann die Zielfunktionsauswertung für jedes Individuum einer Population innerhalb einer Generation gleichzeitig erfolgen. Jedes Individuum wird dabei einem freien Prozessor zugeteilt bis alle Bewertungen erfolgt sind. Es ist möglich eine Population (Punktemenge) sowohl uniform als auch mit Hilfe einer Gaußverteilung zu initialisieren. Der Algorithmus orientiert sich an POHLHEIM (2000, S.204ff), in dem ein strukturell ähnliches Problem, die Parameteridentifikation eines Dieselmotors, bearbeitet wird. Das Verfahren enthält drei Unterpopulationen. In jeder der Unterpopulationen werden verschiedene Mutations- und Rekombinationsoperatoren angewendet. Das Verfolgen von mehreren Strategien macht den Algorithmus nicht nur robuster, sondern lässt in der Analyse auch Rückschlüsse auf die Struktur des Lösungsraums zu. Die Migration erfolgt dabei alle 15 Generationen in einer Ringtopologie. Von der Migration betroffen sind jeweils die besten 20% der Individuen einer Population. Diese ersetzen die schlechtesten 20% der Individuen in der Zielpopulation. Die Mutation erfolgt

für den reellen Temperaturwert per Addition mit einer Zufallszahl, für die diskreten Werte wird immer der nächsthöhere oder –niedrigere Wert aus der Datenbank ausgelesen.

Pseudo-Code 2: Evolutionärer Algorithmus

```

procedure EVOLUTIONÄRER_ALGORITHMUS ( $k_{Ende}$ ,  $x_{Start}$ )
     $k := 0$ ;
    Initialisiere(Populationen mit Startschätzung  $x_{Start}$ )
    for  $k < k_{Ende}$  do
        for Populationenanzahl do
            linearesRanking(Population)
            Nachkommen := Select(80 % der Population)
            mutiere(Nachkommen)
            rekombiniere(Nachkommen)
            Population := Nachkommen + 20% Beste der Population
        end for
        if modulo( $i, 15$ ) = 0 then migriere(Populationen)
        end if
    end for
end procedure

```

2.5 Ergebnis

Um den Algorithmus zu testen, wurden drei Gebäudemodelle eines Einfamilienhauses herangezogen, welche sich lediglich in den zu optimierenden Parametern unterschieden. Das erste Modell repräsentiert die anfängliche Schätzung, um den Startpunkt der Optimierung festzulegen. Im zweiten Modell wurden die Parameter der Startkonfiguration leicht verändert und eine energetische Simulation durchgeführt. Mit der so ermittelten Verbrauchskurve (1 Jahr, stündlich) wurde eine Kalibrierung des ersten Modells durchgeführt. Nach der Kalibrierung sollte die Energieverbrauchskurve des ersten Modells mit dem des zweiten möglichst übereinstimmen. Außerdem konnte verglichen werden in wie weit sich die Eingangsparameter der Optimierung dem zweiten Modell angeglichen hatten. Da die Parameterkonfiguration des zweiten Modells nur wenig von der des ersten abwich, wird sie hier als Nahziel bezeichnet. Beim dritten Gebäudemodell wurde analog vorgegangen, nur dass die Parameter wesentlich stärker verändert wurden als beim zweiten Modell (Fernziel).

Tabelle 1: Schätz-, Nah- und Fernzielkonfiguration

	Schätzkonfiguration	Nahziel	Fernziel
Außenwand	Mauerwerk-1.8 (R-Wert: 3.155)	Leichtbeton-1.42 (R-Wert: 4.011)	Mauerwerk-1.8 (R-Wert: 3.155)
Dach	Leichtbeton-1.22 (R-Wert: 4.639)	Holz-1.23 (R-Wert: 4.605)	Zwischensparren 0.22 (R-Wert: 25.550)
Fenster	Aluminium-4.30 (R-Wert: 1.321)	Aluminium-4.30 (R-Wert: 1.321)	Holz-1.60 (R-Wert: 3.54)
Untere Systemgrenze (Kellerdecke oder Bodenplatte)	Holzbalkendecke- mit Lehm-1.03 (R-Wert: 5.5)	Holzbalkendecke- mit Lehm-1.03 (R-Wert: 5.5)	PUR-0.34 (R-Wert: 16.491)
Heiztemperatur [°C]	20.400	19.600	13.653
Zielfunktionswert der Schätzkonfiguration	-	3646820.15	8426705.67

Im Ergebnis kann man sagen, dass eine Kalibrierung der Parameter eines Gebäudeenergiemodells möglich erscheint. Das Simulierte Abkühlen liefert vor allem gute Ergebnisse, wenn nur ein geringer Fehler in der Konfiguration anzunehmen ist, also der Zielwert dem Startwert sehr nahe ist. Je mehr die anfängliche Schätzung vom Zielwert abweicht, desto eher wird der Algorithmus sein Ziel verfehlen. Der evolutionäre Algorithmus ist dagegen aufgrund seines populationsbasierten Ansatzes, in dem nur ein Teil der Individuen vom Startwert abhängig ist, deutlich robuster. Er liefert fast immer solide Ergebnisse, verfehlt sein Ziel nur selten stark und ist in manchen Durchläufen auch in der Lage das Ziel nahezu perfekt zu treffen. Auch die Tatsache, dass man mit dem Zielfunktionswert stets ein Maß für die Güte der ermittelten Lösung hat, macht die Anwendung der Algorithmen praktikabel. Ist der Zielfunktionswert des Ergebnisses eines Verfahrens zu hoch, kann man das andere Verfahren ausprobieren. Genauso sind auch mehrere Durchläufe eines Verfahrens möglich, da die Algorithmen aufgrund ihres nicht-deterministischen Charakters immer wieder neue Ergebnisse liefern. Ist der Zielfunktionswert am Ende immer noch zu hoch, so kann man die Ergebnisse verwerfen und bei seiner ursprünglichen Schätzung bleiben. Ein weiterer Gesichtspunkt in der praktischen Anwendung ist deutlich bessere Parallelisierbarkeit des evolutionären Algorithmus, welche zu deutlich verminderten und besser planbaren Laufzeiten führt. Für die Testläufe in dieser Arbeit wurden aufgrund des Mangels realer Messdaten ein zweiter Simulationsdatensatz genommen. Das hatte den Vorteil, dass die gefundene Parameterkonfiguration direkt mit der Konfiguration verglichen werden konnte, die angestrebt wurde. Bei der Erweiterung auf reale Datensätze müssen noch Fehler berücksichtigt werden, die auf die Vereinfachung der Realität in ein Computermodell zurückzuführen sind. Je nach Qualität der Modellierungssoftware und der Rückführbarkeit von dessen Annahmen auf die Realität wird die Optimierung unter Umständen gravierend beeinflusst.

Tabelle 2: Ausgewählte Resultate (als Vektor $[[x]_1, [x]_2, [x]_3, [x]_4, [x]_5]$)

	Konfiguration	prozentuale Abweichungen
Nahziel	[4.011, 4.605, 1.321, 4.241, 19.600]	[0.00%, 0.00%, 0.00%, 0.00%, 0.00%]
evolution. Alg. (best)	[4.011, 4.636, 1.333, 4.223, 19.602]	[0.00%, 2.78%, 0.00%, 0.00%, 0.02%]
evolution. Alg. (worst)	[4.075, 10.546, 2.209, 4.241, 19.675]	[4.35%, 66.67%, 57.14%, 0.00%, 0.78%]
sim. Abk.	[4.011, 5.039, 1.321, 4.241, 19.632]	[0.00%, 13.89%, 0.00%, 0.00%, 0.33%]
Fernziel	[3.155, 25.551, 3.549, 16.491, 13.653]	[0.00%, 0.00%, 0.00%, 0.00%, 0.00%]
evolution. Alg. (best)	[3.155, 24.865, 3.542, 16.793, 13.653]	[0.00%, 0.00%, 0.00%, 0.00%, 0.00%]
evolution. Alg. (worst)	[3.444, 39.746, 5.162, 7.113, 14.146]	[7.14%, 10.26%, 33.33%, 28%, 5.28%]
sim. Abk.	[3.946, 2.187, 2.209, 8.533, 14.842]	[10.71%, 100.00%, 16.67%, 20%, 12.72%]

Literatur

- AARTS, E. H. L. & KORST, J. (1990). Simulated Annealing and Boltzmann-Machines: a stochastic approach to combinatorial optimization and neural computing (Repr.). Chichester [u.a.].
- HERMAN, M. (2010). Simulated Annealing & the Metropolis Algorithm: A Parameter Search Method for Models of Arbitrary Complexity.
- LAARHOVEN, P. J. M. VAN & AARTS, E. H. L. (1987). Simulated annealing: theory and applications. Dordrecht.
- POHLHEIM, H. (2000). Evolutionäre Algorithmen: Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis. Berlin [u.a.].
- SPRAVE, J. (1999). Ein einheitliches Modell für Populationsstrukturen in evolutionären Algorithmen (PhD Thesis).

Shape optimization and performance check of streamlined bridges decks

Zouhour Jaouadi

Research Training Group 1462 · Bauhaus Universität Weimar · 99423 Weimar ·

E-Mail: zouhour.jaouadi@uni-weimar.de

Building the best design that ensures economical cost saving and a good performance of the structure in its real boundary conditions is the main focus of civil engineers. Knowledge and experience from optimizing plane wings in aerospace engineering were amply conducted since the previous decades and leading the work to minimize the aerodynamic coefficients. In civil engineering, shape optimization of tall buildings and bridges cross section is still an open field where the aim is to enhance the aerodynamic behaviour. The big challenge that faces the designers is to develop concepts of the bridges deck that avoid excessive deformations and ensure a sufficient structural reliability. Within this framework, this paper outlines the shape optimization of streamlined box sections while considering single and multi-objective functions of the wind coefficients. New method based on regression analysis was proposed, and the performance of the optimized structure was checked.

Keywords: Shape optimization, bridges deck, streamlined section, aerodynamic behaviour.

1 Theory and implemented methods

1.1 Aerodynamic phenomenon

The net wind-pressure forces (measured per unit of span) F_L , F_D and F_M representing the lift, drag and moment respectively, can be rendered dimensionless and are expressed as:

$$C_L(\alpha) = \frac{F_L(\alpha)}{\frac{1}{2}\rho U^2 B}, \quad C_D(\alpha) = \frac{F_D(\alpha)}{\frac{1}{2}\rho U^2 D}, \quad C_M(\alpha) = \frac{F_M(\alpha)}{\frac{1}{2}\rho U^2 B^2}, \quad (1)$$

where B is the bridge width, D is the deck depth, ρ is air density and U is the mean value of the reference wind speed.

1.2 Numerical simulations for aerodynamic parameters

Computational fluid dynamics (CFD) is considered as the most important model used by engineers. In this work, the numerical analysis is implemented by using VXflow solver. This Program developed by MORGENTHAL (2002). Many studies (ABBAS & MORGENTHAL 2016, MORGENTHAL & WALTHER 2007) show that it provides reliable results while comparing to wind tunnel tests.

1.3 Implementation of response surface methods

1.3.1 Sampling of input parameters

Since this paper focuses on the optimization of trapezoidal streamlined bridge section, the width of the lane is considered fixed and the section is retained symmetric with y axis. The remaining five geometric parameters are considered variables within fixed intervals defined a priori, so that the obtained cross section cannot be concave, and the edges are connected by piecewise linear functions. Many techniques can be used during the sampling part. In this work, Latin hypercube sampling method (LHS) is implemented. Two approaches considered in this paper; direct approach while considering 0 angle of attack. The second is an advanced approach where the aerodynamic coefficients are evaluated in different angles of attack varying from -6 till +6 degrees for each geometric sample. Intensive simulation is conducted in CFD simulation for both approaches by conducting 500 samples. The output is the mean wind coefficients. In the direct approach, the mean wind coefficient is used directly as an output for this model, while in the advanced approach, the mean wind coefficient is evaluated for each angle of attack, and later calculation is done by linear and quadratic regression analysis to evaluate the slope for each case of wind coefficients separately.

1.3.2 Kriging

Kriging (FORRESTER et al. 2008) approximation can be expressed as follows:

$$\hat{Y}(X) = \mu + \varepsilon(X), \quad (2)$$

where μ is an unknown constant trend. The residuals $\varepsilon_i = \varepsilon(X_i)$ are correlated with variance σ^2 and a correlation matrix ψ :

$$\Psi_{ij} = \text{Cor}(X_i, X_j) = \exp\left(-\sum_{h=1}^k \theta_h (x_{ih} - x_{jh})^2\right) \quad (3)$$

The estimation of the kriging parameters $\{\mu, \sigma^2, \theta\}$ giving a set of observations \bar{Y} are generally obtained by the maximum Likelihood approach or by cross validation. In this study, two methods for the estimation of kriging model parameters, maximum Likelihood estimation (MLE) and minimizing the coefficient of prognosis (CoP) are implemented.

1.3.3 Maximum Likelihood estimation

Assuming that there is no error in the observations vector \bar{Y} , the Likelihood L of the approximate values \hat{Y} become equals to the observed values \bar{Y} , which is calculated according to the following equation:

$$L[(\hat{Y} = \bar{Y})|\mu, \sigma] = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)^n |\Phi|^{\frac{1}{2}}}} \exp\left(-\frac{(\bar{Y} - 1\mu)^T \Phi^{-1} (\bar{Y} - 1\mu)}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

Simplifying the Likelihood maximization by taking the natural logarithm of L gives the following logarithm function:

$$\ln(L) = -\frac{1}{2} (n \ln(2\pi) + n \ln(\sigma^2) + \ln(|\Phi|)) - \left(\frac{(\bar{Y} - 1\mu)^T \Phi^{-1} (\bar{Y} - 1\mu)}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

After the evaluation of θ_k , differentiating with respect to the free variables μ and σ^2 leads to find out the optimum mean values $\hat{\mu}$ and $\hat{\sigma}^2$ according to the following equations:

$$\hat{\mu} = \frac{1^T \Phi^{-1} \bar{Y}}{1^T \Phi^{-1} 1}, \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{(\bar{Y} - 1\mu)^T \Phi^{-1} (\bar{Y} - 1\mu)}{N}. \quad (6)$$

The weights can be calculated according to the following equation:

$$W = \Phi^{-1} (\hat{Y} - 1\hat{\mu}). \quad (7)$$

Given θ , the bases function vector $\Psi(X^*)$ for the desired point can be evaluated. The value of the surrogate model at the desired point is calculated according to the following equation:

$$\hat{Y}(X^*) = W^T \Psi(X^*) + \hat{\mu} \quad (8)$$

1.3.4 Minimizing the coefficient of prognosis

Instead of using the maximum Likelihood method to evaluate the coefficient θ as explained previously, it can be done by minimizing the coefficient of prognosis (*CoP*), which is defined as follows (MOST & WILL 2008):

$$CoP = \frac{SS_E^{Pred}}{SS_T}, \quad (9)$$

where SS_E^{Pred} is the sum of the squared prediction errors.

1.3.5 Cross validation and selection criteria of models

Cross validation process interferes here to provide the evidence of validating the model. In this work, p-fold cross validation method is conducted. The data is divided into 10 equal subsets and the holdout method is repeated p times. In each iteration, one of p subset is used as the test set and the (p-1) remaining subsets form altogether the training set. The approximation function is evaluated from the training set, then this function is used to predict the output values by using solely the test set. The coefficient of determination R^2 is widely used as an error estimator (MONTGOMERY & RUNGER 2010).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad SSE = \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_T - \hat{Y}_T)^2, \quad SST = \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_T - Y_{Tmean})^2, \quad (10)$$

Where \bar{Y}_T is the training set and Y_{Tmean} is the mean value of the training samples. R^2 measures the predictive quality of the fitted model. Another parameter is the predicted residual error sum of squares (*Press*) static. Its formula is:

$$Press = \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \hat{Y}_{i,-i})^2, \quad (11)$$

Where N is the number of data points in the training set, Y_i is the outcome of the i^{th} data point, and $\hat{Y}_{i,-i}$ is the prediction from a model that is trained using all the data except the i^{th} data point. In other words, Press statistic is the *SSE* from hold-one-out cross validation. Another parameter used to validate a model is R_{Adj}^2 , which is defined as follows:

$$R_{Adj}^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(p - 1)}{p - q - 1}, \quad (12)$$

where p is the sample size and q is the number of independent variables. To select the best fitted model, the one can choose the model with the lowest value of *Press* or the largest value of R_{Adj}^2 .

1.4 Single and multi-objective optimization

The general formula of the optimization problem is given as follows:

$$\min_x f(x), \text{ s.t. } g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, p \quad (13)$$

where g_i defines the geometry inequality constraints functions. The penalty function is described as follows:

$$\min_x P(x), \text{ where, } P(x, \beta) = f(x) + \sum_{j=1}^p \beta_j g_j^2(x). \quad (14)$$

β_j is a positive value when $g_j(x) > 0$ and is equal to zero when $g_j(x) \leq 0$. The choice of β_j is sensitive, and large values can cause inefficiency in solution with high accuracy. The weighted sum formula of k objective functions is presented as follows:

$$\min_x \sum_{i=1}^k W_i f(x); \quad W_i > 0; \quad \sum_{i=1}^k W_i = 1. \quad (15)$$

Particle swarm optimization method (PSO) is implemented.

1.5 Performance check and validation

The self-excited Lift F_L and moment F_M of a bluff body can be expressed in a linear displacement h and rotation α and their first derivatives in a linearized form as following:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 B [KH_1^* \frac{\dot{h}}{U_\infty} + KH_2^* \frac{B \dot{\alpha}}{U_\infty} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B}], \quad (16)$$

$$F_M = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 B^2 [KH_1^* \frac{\dot{h}}{U_\infty} + KA_2^* \frac{B \dot{\alpha}}{U_\infty} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B}], \quad (17)$$

$$K = \frac{B\omega}{U_\infty}, \quad (18)$$

where ρ is the air density, B is the chord of the airfoil, U_∞ is the oncoming wind velocity. A_i^* and H_i^* ($i = 1, \dots, 4$) are non-dimensional functions of K known as aerodynamic flutter derivatives associated with self-excited lift and moment, respectively. K is the reduced frequency and ω is the frequency of bridge oscillation under aerodynamic forcing.

2 Results

2.1 Numerical simulations for the choice of the model

We plot 3D surface for the response with respect to 2 variables solely.

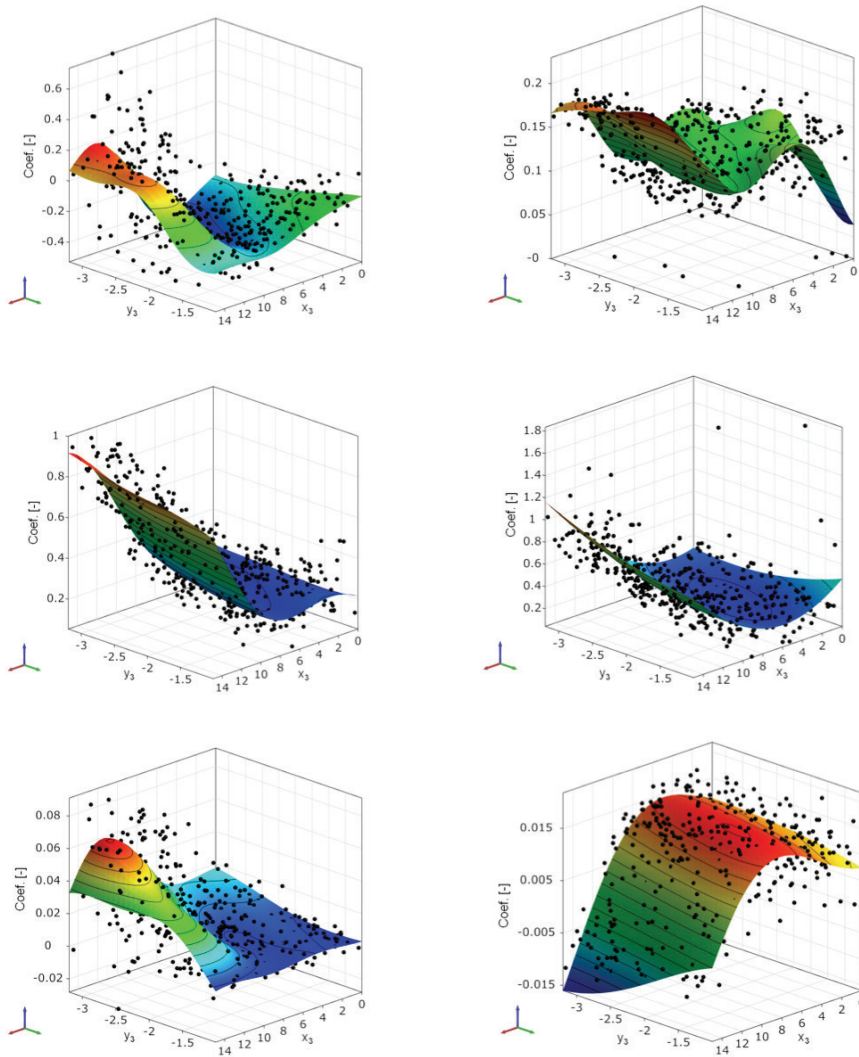


Fig. 1: Response surface of single wind coefficient functions obtained from Kriging: direct approach (right), advanced approach (right).

2.2 Single objectives optimization

2.2.1 Optimized shapes for single functions

The geometric constraints are implemented in the constraints for each fitted function before the optimization. The particle swarm optimization method has been implemented to find the

optimized shape for the three cases. The optimal obtained shapes are plotted in the following figures:

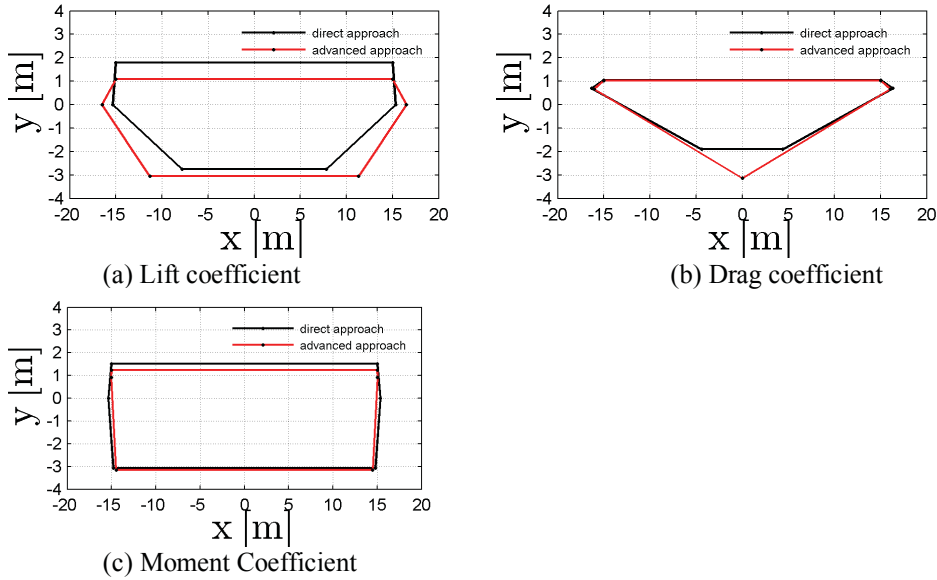


Fig. 2: Optimized shape of single objective functions

2.2.2 Performance check of the optimal single designs

The aerodynamic derivatives are used to check the performance of the optimal obtained shapes. The following plots show the variation of the derivatives H_1^* and A_2^* in function of Vr .

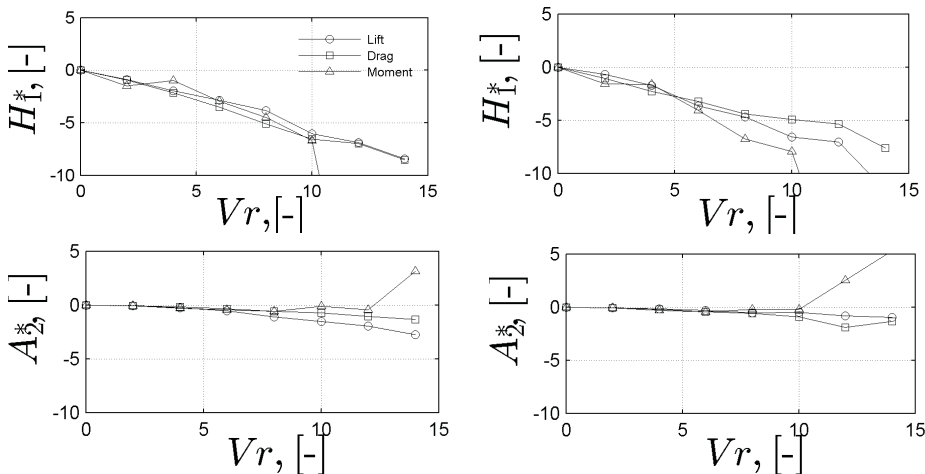


Fig. 3: Aerodynamic derivatives H_1^* and A_2^* of the optimized section: direct approach (right), advanced approach (left).

The aerodynamic derivative H_1^* is negative for the whole range of reduced speed Vr . This means that the obtained deck cross section has a stable SDOF behaviour against vertical instability. The torsional damping flutter derivative A_2^* for the case of the optimal moment cross section shows a tendency to reverse sign over an operating range of Vr . This behaviour shows that the moment optimal shape is unstable with regards to the torsional flutter.

2.3 Multi-objective optimization

4 cases are selected from Pareto front to be validated.

2.3.1 Optimized shapes of the multi-objective functions

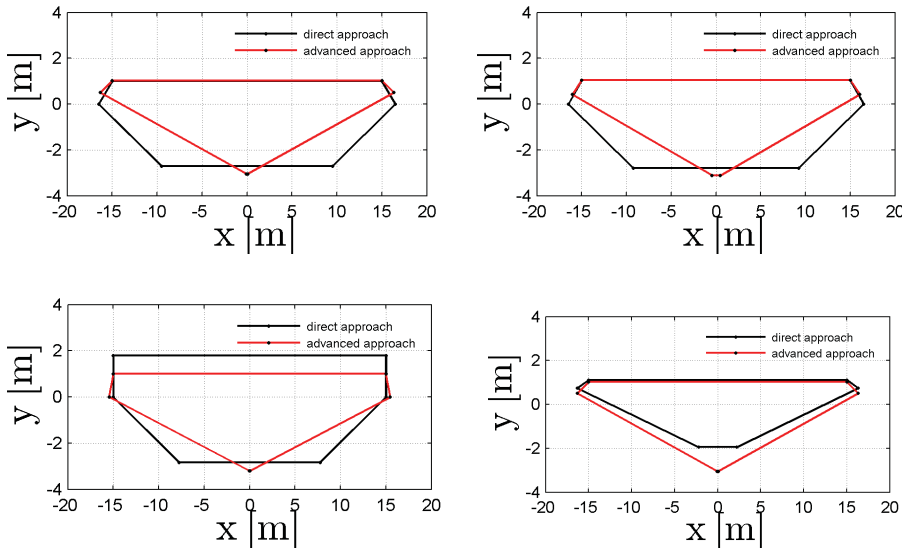
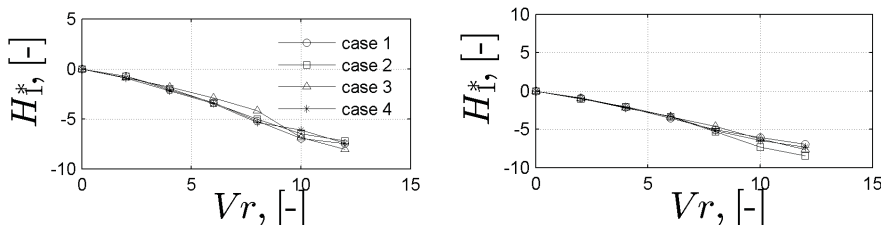


Fig.4: Optimized shapes for the different cases of multi-objective optimization: (top-right) case 1: $W1 = [1/3; 1/3; 1/3]$, (top-left) case 2: $W2 = [1/2; 1/2; 0]$, (bottom-right) case 3: $W3 = [1/2; 0; 1/2]$, (bottom-left) case 4: $W4 = [0; 1/2; 1/2]$.

2.3.2 Performance check of the optimal designs

The variation of the aerodynamic derivatives of heaves and pitch motion H_1^* and A_2^* for the four selected cases is shown as follows:



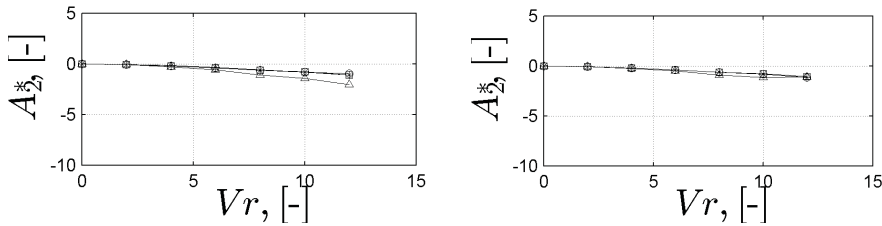


Fig. 5: Aerodynamic derivatives for the heave and pitch motion: direct approach (left), advanced approach (right).

The aerodynamic derivatives H_1^* and A_2^* remain negative over the range of the reduced wind speed Vr for the four selected cases. This means that the selected sections are stable with regards to vertical and torsional flutter.

Literature

- ABBAS, T. & MORGENTHAL, G. (2016), Framework for sensitivity and uncertainty quantification in the flutter assessment of bridges, *Probabilistic Engineering Mechanics* 43, 91-105.
- FORRESTER, A. I. J., SOBESTER, A. & KEANE, A. J. (2008), *Engineering design via surrogate modelling: a practical guide*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Ltd.
- MONTGOMERY, D. C. & RUNGER, G. C. (2010), *Applied statistics and probability for engineers*, John Wiley & Sons.
- MORGENTHAL, G. & WALTHER, J. H. (2007), An immersed interface method for the vortex-in-cell algorithm, *Computers & structures* 85, no. 11-14, 712-726.
- MORGENTHAL, G. (2002), *Aerodynamic analysis of structures using high-resolution vortex particle methods*, PhD thesis, University of Cambridge.
- MOST, T. & WILL, J. (2008), Metamodel of optimal prognosis – an automatic approach for variable reduction and optimal metamodel selection, In: *Proceedings Weimarer Optimierungs- und Stochastikstage 5.0*, Weimar, Germany, 20/11/2008.

Baustelleneinrichtungsplanung mittels Ganzzahliger Optimierung

Katrin Riga¹, Katrin Jahr² und Tobias Dusch³

¹Technische Universität Kaiserslautern · Paul-Ehrlich-Straße 14 · 67663 Kaiserslautern ·

E-Mail: riga@mathematik.uni-kl.de

²Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München ·

E-Mail: katrin.jahr@tum.de

³Technische Universität Kaiserslautern · Paul-Ehrlich-Straße 14 · 67663 Kaiserslautern ·

E-Mail: tobias.dusch@gmx.de

Die Ausführungsplanung für Bauprojekte wird zurzeit weitgehend ohne digitale Unterstützung durchgeführt und ist somit stark vom Fachverstand und der praktischen Erfahrung des Planers abhängig. In diesem Beitrag stellen wir eine mathematische Methode zur Optimierung von Baustelleneinrichtungsplänen am Beispiel der Positionierung von Turmdrehkränen vor. Wir präsentieren ein ganzzahliges lineares Optimierungsmodell zur teilautomatisierten Erstellung von Baustelleneinrichtungsplänen, welches sich besonders durch ein ausführliches Preprocessing der Daten und die Repräsentation der einzelnen Objekte durch konvexe Hüllen auszeichnet. In einer Fallstudie wurden mit einem externen Solver plausible Ergebnisse erzielt.

Keywords: Baustelleneinrichtungsplanung, Optimierung, MIP

1 Einleitung

Das große Potential der fortschreitenden Digitalisierung des AEC Sektors, insbesondere der Bereitstellung umfangreicher Informationen in einem digitalen Gebäudemodell (Building Information Modell – BIM), wird bereits in frühen Planungsphasen von Bauwerken genutzt. Trotz des großen Einflusses der Baustelleneinrichtung (BE) auf die Baustellengemeinkosten und die Produktivität des Bauvorhabens ist die Arbeitsvorbereitung bisher wenig formalisiert und digitalisiert. Die Planung erfolgt zumeist händisch und ohne wissenschaftlich fundierte Unterstützungswerkzeuge. Die Dimensionierung und Positionierung der einzelnen Elemente der BE erfolgt zumeist anhand von Faustformeln und Erfahrungswerten der Planer, es erfolgt keine qualitative oder quantitative Bewertung. Der Erfolg der Ausführungsplanung ist somit vom Fachverstand und der praktischen Erfahrung des Planers abhängig.

In diesem Beitrag stellen wir eine mathematische Methode zur Optimierung von Baustelleneinrichtungsplänen vor. Durch die teilautomatisierte Erstellung von BE-Plänen wird nicht nur der Arbeitsaufwand des Planers deutlich reduziert, es können auch besonders kostengünstige und robuste Lösungen gefunden werden. Zur Formulierung eines ganzzahlig linearen Optimierungsproblems für das Baustellenlayout werden zunächst für alle BE-Gegenstände alle möglichen Positionen auf dem Baufeld bestimmt. Anschließend werden im Preprocessing alle unzulässigen Positionen entfernt (bspw. aufgrund unzureichender Kranüberdeckung oder fehlender Zugänglichkeit), um den Lösungsraum einzugrenzen und das verbleibende Optimierungsproblem effizient mit einem Standard-Solver lösen zu können.

Im ersten Teil des Papers beschreiben wir die verwendeten Methoden. Anschließend stellen wir das entwickelte Modell genauer vor und präsentieren eine Fallstudie. Wir beenden das Paper mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Arbeitsschritte.

2 Methoden

Wie beispielsweise in ABDELMEGID et al. (2015), CHAU (2004) und TAM et al. (2001) werden für Optimierungsprobleme im Bereich der Baustellenplanung in der Literatur sehr häufig genetische Algorithmen verwendet - also Heuristiken basierend auf den genetischen Operationen Selektion und Variation. Algorithmen dieser Klasse enthalten stochastische Komponenten und liefern meist keine Garantie für die Optimalität der gefundenen Lösung (GERDTS & LEMPIO 2011). Außerdem ist die Konvergenz vieler genetischer Algorithmen stark von der Wahl der Parameter abhängig (SCHÖNEBURG et al. 1994). In dieser Arbeit soll das betrachtete Problem deshalb mittels eines gemischt-ganzzahligen linearen Programms gelöst werden. In einem gemischt-ganzzahligen linearen Programm (mixed integer program, MIP) ist eine lineare Zielfunktion über einer Menge zu optimieren, die durch lineare (Un-)Gleichungen beschränkt ist und für die ein Teil der Variablen nur ganzzahlige Werte annehmen darf. Ein gegebenes Optimierungsproblem liegt im Allgemeinen nicht in mathematischer Formulierung vor, auch gegenläufige Optimierungsziele treten häufig auf. Wie beispielsweise in NEMHAUSER & WOLSEY (1988) erläutert, kann ein in der Praxis auftretendes Optimierungsproblem oft auf unterschiedliche Weisen als MIP formuliert werden. Die Auswahl einer geeigneten Formulierung kann dabei jedoch die zur Lösung des MIPs – und damit auch des Ausgangsproblems – benötigte Laufzeit stark beeinflussen. So ist es möglich, dass für eine Formulierung des Problems keine Lösung in angemessener Zeit gefunden werden kann, während eine andere Formulierung bereits nach kurzer Zeit zu einer optimalen Lösung führt. Mit einer guten Formulierung können häufig größere – und damit für die Praxis relevantere – Instanzen gelöst werden. Ein maßgeblicher Vorteil von MIPs ist ihre große Flexibilität. Kleine Veränderungen der Problemstellung wie beispielsweise eine zusätzliche Bedingung können in vielen Fällen relativ einfach berücksichtigt werden, ohne dass eine völlig neue Formulierung gefunden werden muss. Auch können nicht lineare Gleichungen in vielen Fällen durch geschickte Formulierung und mit Hilfe zusätzlicher Variablen linearisiert werden, was auch die Modellierung vieler zunächst nichtlinearer Bedingungen in MIPs erlaubt.

Zum Lösen von MIPs gibt es exakte Verfahren wie zum Beispiel Branch and Bound- oder Branch and Cut-Algorithmen. Diese Verfahren sind beweisbar in der Lage, eine optimale Lösung eines MIPs zu finden oder festzustellen, dass das Problem unbeschränkt oder unlösbar ist (SCHRIJVER 1998). Effiziente Implementierungen dieser Verfahren, die sich generisch zur Lösung beliebiger MIPs einsetzen lassen, stehen in Form verschiedener kommerzieller und quelloffener Softwarepakete zur Verfügung. Diese sind so leistungsfähig, dass in den meisten Fällen bezüglich ihrer Größe anwendungsrelevante Instanzen gelöst werden können. Solche kommerziellen Solver sind beispielsweise Gurobi¹ (in dieser Arbeit verwendet) und

¹ <http://www.gurobi.com/index> (für Forschungszwecke kostenfrei nutzbar)

CPLEX®², als alternative Open-Source-Solver stehen unter anderem SCIP³ und CBC⁴ zur Verfügung.

Ein weiterer Vorteil beim Verwenden von MIPs wird deutlich, wenn die Qualität einer zulässigen Lösung betrachtet werden soll. Es ist für MIPs zu jedem Zeitpunkt mittels primaler und dualer Schranken ermittelbar, wie weit der Zielfunktionswert der aktuell besten gefundenen Lösung maximal vom optimalen Zielfunktionswert entfernt ist (WOLSEY 1998). Damit besteht die Möglichkeit, einen Lösungsalgorithmus bereits dann zu stoppen, wenn eine hinreichend gute Lösung gefunden wurde – also eine Lösung, deren Zielfunktionswert um nicht mehr als eine vorgegebene (prozentuale) Fehlertoleranz vom optimalen Zielfunktionswert abweicht.

3 Modell

In dieser Arbeit wird ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell für die Baustelleneinrichtungsplanung betrachtet. Erste Ergebnisse für das vorgestellte Modell finden sich in DUSCH (2017).

3.1 Grundlagen

Im Fokus der Betrachtung steht die bezüglich Kostenminimierung optimale Auswahl und Platzierung von Turmdrehkränen, im Folgenden als Krane bezeichnet. Für die mathematische Formulierung relevante Eigenschaften der verschiedenen Kranarten sind dabei die benötigte Stellfläche, die maximale Hakenhöhe, die Auslegerlänge und die maximale Traglast, welche für jede Kranart in Form einer interpolierten Traglastkurve zur Verfügung steht. Nähere Informationen dazu können in SCHACH & OTTO (2008) gefunden werden.

Es ergeben sich die folgenden Bedingungen, die in diesem Modell an zulässige Kranpositionen gestellt werden:

- a) Jeder Punkt in einem Bauwerk muss unter Berücksichtigung eines gegebenen Sicherheitsabstandes von mindestens einem Kran überschwenkt werden können.
- b) Jeder Punkt einer Lagerfläche muss von mindestens einem Kran überschwenkt werden können.
- c) Für jede Baustraße muss es mindestens einen Kran geben, der die gesamte Breite der Straße an einer Stelle überschwenken kann.
- d) Die erforderlichen Stellflächen müssen eingehalten werden (zur Vereinfachung werden alle Stellflächen quadratisch modelliert).
- e) Die ausreichende Tragfähigkeit des Bodens muss gewährleistet sein.
- f) Alle Sicherheitsabstände von einem Kran zu Bauwerken, Baustraßen, Baugruben, Containeranlagen, Lagerflächen und sonstigen Hindernissen müssen eingehalten werden.
- g) Kein Kran darf im Arbeitsprozess eine Containeranlage überschwenken.
- h) Die Hakenhöhe eines Krans muss höher sein als alle im Arbeitsprozess mit einem gegebenen Sicherheitsabstand zu überschwenkenden Hindernisse.
- i) Für jede schwere Last muss es einen Kran geben, der diese unter Berücksichtigung seiner Traglastkurve transportieren kann.

² <https://www.ibm.com/analytics/data-science/prescriptive-analytics/cplex-optimizer>

³ <http://scip.zib.de/>

⁴ <https://projects.coin-or.org/Cbc>

- j) Schwere Lasten sollen ohne Übergabe von einem Kran zu einem anderen transportiert werden können.

Im Vergleich mit bestehender Literatur wie beispielsweise HUANG & WONG (2018) ist vor allem das Vorgehen bezüglich potentieller Kranstandorte in diesem Modell hervorzuheben. Mögliche Plätze müssen dem Programm nicht als Eingabe übergeben werden, sondern werden unter Beachtung aller relevanten Bedingungen errechnet. Dies ist ein wichtiger Automatisierungsschritt in der Baustelleneinrichtungsplanung. Erforderlich dafür ist allerdings die Diskretisierung der Baufläche. Dazu wird ein virtuelles Gitter über die Fläche gelegt. Ein Quadrat dieses Gitters entspricht dabei einem Quadratmeter des Baustellenareals. Auf diese Art ist es möglich, im Gitter bestimmte Informationen zu hinterlegen, wie zum Beispiel die Position bereits bestehender Gebäude. Auch bei der Modellierung solcher Objekte wird ein neuer Ansatz verfolgt: Statt wie in der Literatur üblich alle Baustellenobjekte durch Rechtecke zu approximieren, verwendet dieses Modell konvexe Hüllen zur Approximation. Hierdurch können Bauwerke mittels konvexer Polytope und Kreise wesentlich genauer abgebildet werden.

3.2 Preprocessing

Wie in NEMHAUSER & WOLSEY (1988) beschrieben ist die Idee beim Preprocessing, kleine Teilprobleme bereits vor dem Lösen des eigentlichen Problems zu lösen, um so die Problemformulierung zu vereinfachen. Konkret sollen in dieser Betrachtung die folgenden fünf Mengen so konstruiert werden, dass einige der Bedingungen an zulässige Kranpositionen von vornherein von allen Elementen der Menge erfüllt werden.

- LUP* Die Menge aller Tripel (x, y, art) , für die ein Kran der Kranart $art \in ART$ so aufgestellt werden kann, dass die linke untere Ecke seiner Stellfläche an Position (x, y) liegt, mit ART die Menge aller betrachteten Kranarten und $(x, y) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ die Koordinaten einer Position im Gitter.
- BW_(a,b)^{av}* Die Menge aller Tripel (x, y, art) , für die ein Kran der Kranart $art \in ART$ an Position (x, y) in Reichweite des Bauwerkpunktes $(a, b) \in BW$ ist, mit BW die Menge aller (x, y) -Koordinaten, die ein zu errichtendes Bauwerk repräsentieren.
- Lag_(a,b)^{av}* Die Menge aller Tripel (x, y, art) , für die ein Kran der Kranart $art \in ART$ an Position (x, y) in Reichweite des Lagerflächenpunktes $(a, b) \in Lag$ ist, mit Lag die Menge aller (x, y) -Koordinaten, die eine Lagerfläche repräsentieren.
- BS_i^{av}* Die Menge aller Tripel (x, y, art) , für die ein Kran der Kranart $art \in ART$ an einem beliebigen Punkt die gesamte Breite der Baustraße $i \in \{1, \dots, a_{BS}\}$ überschwenken kann, mit a_{BS} die Anzahl der Baustraßen.
- T_(x⁽¹⁾, x⁽²⁾, g)^{sat}* Die Menge aller Tripel (x, y, art) , für die ein Kran der Kranart $art \in ART$ an Position (x, y) unter Berücksichtigung der Traglastkurve die schwere Last $(x^{(1)}, x^{(2)}, g) \in SL$ von $x^{(1)}$ nach $x^{(2)}$ transportieren darf, mit SL die Menge aller schweren Lasten, dargestellt durch Tripel bestehend aus Aufnahmeort $x^{(1)}$, Einbauort $x^{(2)}$ und Gewicht $g \in \mathbb{N}_+$.

Die Mengenkonstruktion soll an dieser Stelle beispielhaft für eine Bedingung der Menge *LUP* erläutert werden, für die restlichen Konstruktionen sei wiederum auf DUSCH (2017) verwiesen. Für *LUP* sollen alle Kombinationen ausgeschlossen werden, die Sicherheitsabstände nicht einhalten können, die über eine Containeranlage schwenken müssen, die zu nah an zum Überschwenken zu hohen Gebäuden stehen, und die für einen effektiven Einsatz zu

weit von einem zu errichtenden Bauwerk entfernt sind. Für das Überschwenken der Containeranlagen wäre das Vorgehen wie folgt: Für jedes Tripel $(x, y, art) \in LUP$ werden die Eckpunkte zu errichtender Bauwerke betrachtet, die in Reichweite des Auslegers liegen. Von jedem dieser Punkte wird dann ein Rechteck zum Mittelpunkt der Kranstellfläche aufgezo-gen. Im Anschluss ist zu überprüfen, ob in einem dieser Rechtecke ein Punkt $(a, b) \in Con$ enthalten ist, mit Con die Menge aller (x, y) -Koordinaten, die einen Container auf der Bau-stelle repräsentieren. Ist dies der Fall, so wird das entsprechende Tripel (x, y, art) aus LUP entfernt. Abbildung 1 veranschaulicht ein Beispiel, bei dem ausschließlich die Kombination für Kran 1 aus LUP entfernt würde.

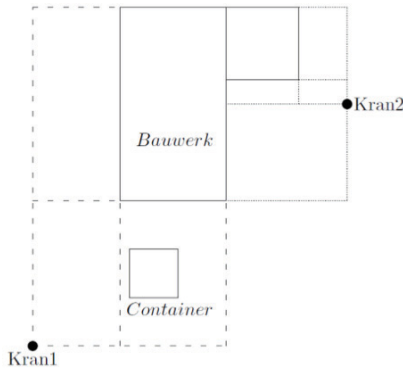


Abb. 1:

Skizze des Verfahrens zum Entfernen aller Kombinationen $(x, y, art) \in LUP$, die Bedingung g) nicht erfüllen

3.3 Problemformulierung

Für die mathematische Formulierung des Problems werden zusätzlich benötigt:

- $kran_{x,y,art}$ Variable mit Wert 1, wenn ein Kran der Kranart art mit seiner linken unteren Ecke in Punkt (x, y) platziert wird, 0 sonst
- $BW_{missing}$ Menge aller Punkte $(a, b) \in BW$, die nach dem Erstellen einer Lösung nicht in den kombinierten Kranauslegerflächen enthalten sind
- $Lag_{missing}$ Menge aller Punkte $(a, b) \in Lag$, die nach dem Erstellen einer Lösung nicht in den kombinierten Kranauslegerflächen enthalten sind
- BS_i Menge aller (x, y) -Koordinaten, die Baustraße $i \in \{1, \dots, a_{BS}\}$ darstellen

Bedingung (1) setzt Forderung c) um. Sie legt fest, dass es für jede Baustraße mindestens einen Kran gibt, der an einer Stelle ihre gesamte Breite überschwenken kann. Forderungen i) und j) zum Transport schwerer Lasten werden in Bedingung (2) umgesetzt; für jede schwere Last muss es mindestens einen Kran geben, der sie von ihrem Aufnahmeort zum Einbauort transportieren darf.

$$\sum_{(x,y,art) \in BS_i^{av}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (a, b) \in BS_i, i \in \{1, \dots, a_{BS}\} \quad (1)$$

$$\sum_{(x,y,art) \in T_{(x^{(1)}, x^{(2)}, g)}^{sat}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (x^{(1)}, x^{(2)}, g) \in SL \quad (2)$$

Entsprechend der Forderungen a) und b) legen die Bedingungen (3) und (4) fest, dass jeder Punkt eines zu errichtenden Bauwerks bzw. einer Lagerfläche von mindestens einem Kran erreicht werden muss.

$$\sum_{(x,y,art) \in BW_{(a,b)}^{av}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (a,b) \in BW \quad (3)$$

$$\sum_{(x,y,art) \in Lag_{(a,b)}^{av}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (a,b) \in Lag \quad (4)$$

Um eine Laufzeit von mehreren Tagen auf Grund der für diese beiden Bedingungen sehr großen relevanten Mengen zu verhindern, werden die beiden Forderungen in der Implementierung in einem ersten Schritt abgeschwächt. Statt aller Punkte eines Bauwerks zu überprüfen, werden im Fall von Polytopen nur die Eckpunkte und im Fall von Kreisen der Mittelpunkt sowie acht auf der Kreislinie gleichverteilt liegende Punkte betrachtet. Als Folge kann es Punkte innerhalb eines Bauwerks bzw. einer Lagerfläche geben, die in einer ersten Lösung von keinem Kran versorgt werden können. Um diese Verletzung der Forderungen zu beheben, werden in einem solchen Fall die Bedingungen (5) und (6) hinzugefügt. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis alle Punkte mit mindestens einem Kran erreichbar sind.

$$\sum_{(x,y,art) \in BW_{(a,b)}^{av}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (a,b) \in BW_{missing} \quad (5)$$

$$\sum_{(x,y,art) \in Lag_{(a,b)}^{av}} kran_{x,y,art} \geq 1 \quad \forall (a,b) \in Lag_{missing} \quad (6)$$

Wie in DUSCH (2017) dargelegt, können mittels fünf weiterer Bedingungen mehrere Lösungen aus verschiedenen Kombinationen von Kranarten erstellt werden. Die zu maximierende Zielfunktion (12) setzt sich zusammen aus den negativen Kosten pro eingeplantem Kran, sowie Strafen in dem Fall, dass in den Lösungsvariationen dieselbe Kranart verwendet wird. Die Kosten für einen Kran ergeben sich dabei aus Fixkosten und variablen Kosten je Monat.

$$\max \sum_{(x,y,art) \in LUP} c_{art} kran_{x,y,art} + c^{8,9} f_{x,y,art}^{(8,9)} + c^{10,11} f_{x,y,art}^{(10,11)} \quad (12)$$

4 Fallstudie

Das IP wird mit dem kommerziellen Solver Gurobi auf einem Windows-basierten Computer mit AMD FX 6300 CPU mit 3,5 GHz sowie 16 GB DDR3 RAM gelöst.

4.1 Instanz

In der hier erläuterten Anwendung des Programms wurden die folgenden Kranarten verwendet:

- Liebherr 200 EC-H 10⁵
maximale Ausladung: 60 m, maximale Hakenhöhe: 60 m, erforderliche Stellfläche: 6×6 m, Kosten: 15.000 + 7.500 / Monat
- Liebherr 200 EC-H 10 Litronic⁵
maximale Ausladung: 60 m, maximale Hakenhöhe: 65 m, erforderliche Stellfläche: 8×8 m, Kosten: 20.000 + 9.500 / Monat
- Liebherr 112 EC-H 8 mit Turm 120 HC⁶

⁵ <https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/249210/liebherr-200ec-h-10-litronic-datasheet.pdf>

⁶ http://s3-eu-west-1.amazonaws.com/download.niederstaetter.it/Download_it_Liebherr_Obendreher_112_EC-H_8.pdf

maximale Ausladung: 55 m, maximale Hakenhöhe: 48 m, erforderliche Stellfläche: 5×5 m, Kosten: 9.000 + 6.500 / Monat

- Liebherr 112 EC-H 8 mit Turm 185 HC⁶
maximale Ausladung: 55 m, maximale Hakenhöhe: 68 m, erforderliche Stellfläche: 8×8 m, Kosten: 10.000 + 7.000 / Monat

Die einzuhaltenden Sicherheitsabstände liegen jeweils zwischen zwei und fünf Metern (eine genaue Auflistung ist DUSCH (2017) zu entnehmen), der maximale Abstand eines Krans zu einem Bauwerk soll 12 m betragen, die Dauer der Baustelle wird auf 10 Monate angesetzt und es soll lediglich eine Lösung erstellt werden.

Betrachtet wird eine Instanz, die einem realen Bauprojekt nachempfunden ist. Die Bauwerks-höhe beträgt 35 m, schwere Lasten werden nicht berücksichtigt. Für das Projekt wurden insgesamt drei Krane eingesetzt. Das in Kapitel 3 vorgestellte Programm liefert unter Einhaltung aller Forderungen für diese Instanz eine Lösung, die lediglich zwei Krane verwendet (siehe Abbildung 2).

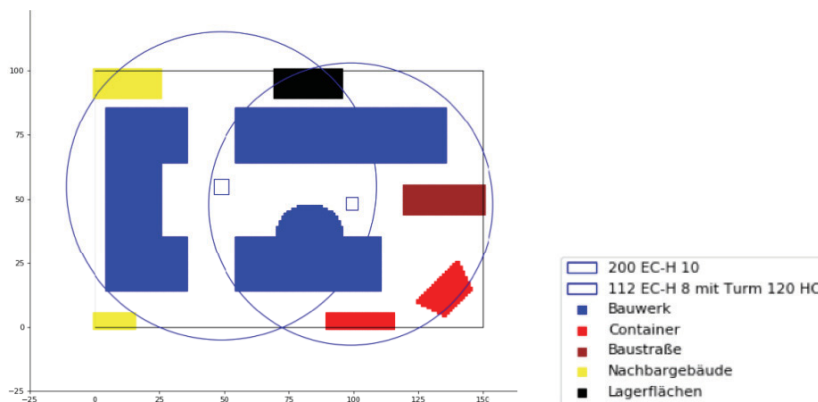


Abb. 2: Instanz mit Lösung

4.2 Resultate

Da alle in Kapitel 3.1 aufgeführten Forderungen entweder als harte Bedingungen in der Problemformulierung eingebracht wurden oder bereits im Preprocessing einfließen, kann jede zulässige Lösung des Modells als sinnvoller, umsetzbarer Plan betrachtet werden. Insbesondere aus finanzieller Sicht stellt eine optimale Lösung auf Grund der im Modell durchgeführten Kostenminimierung eine effiziente Möglichkeit der Kranpositionierung dar. Auch die Laufzeit des Programms für die betrachtete Instanz ist mit 79 Minuten durchaus akzeptabel. Durch eine detailliertere Laufzeitanalyse konnte in DUSCH (2017) bestätigt werden, dass das Modellieren der Baustellenobjekte mittels konvexer Hüllen eine laufzeiteffiziente Alternative zur Darstellung durch Rechtecke darstellt. Außerdem wurde die starke Auswirkung der Größe der Menge *LUP* auf die Gesamtlaufzeit des Programms deutlich.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Modell für die Positionierung von Kranen hebt sich insbesondere durch die Modellierung von Baustellenobjekten mittels konvexer Hüllen, sowie durch den Verzicht auf

fest vorgegebene potentielle Kranstandorte ab. Es ist gelungen, ein Programm für die Erstellung umsetzbarer und kosteneffizienter Pläne zur Kranpositionierung zu entwickeln.

Um das Modell zu erweitern und die Baustellenplanung noch umfassender zu automatisieren, wird in einem nächsten Schritt der zeitliche Bauablauf bei der Planung der Krane berücksichtigt. Dazu werden verschiedene Bauphasen betrachtet und Krane so eingesetzt, dass ihre Auslastung mit Blick auf die Minimierung der Kosten möglichst gleichmäßig gegeben ist. Unter diesem Aspekt wäre es zum Beispiel vorstellbar, dass ein Kran nicht für alle Bauphasen aufgestellt wird, sondern nur über den Zeitraum hinweg, zu dem er tatsächlich zum Lastentransport benötigt wird. Auch eine Ausweitung hinsichtlich der zu platzierenden Objekte ist vorgesehen. So sollen nicht nur Krane möglichst wirksam und wirtschaftlich aufgestellt werden, sondern auch Lagerflächen effizient lokalisiert sein. Ein weiterer wichtiger Schritt wird die Eingabeoptimierung sein. Eingaben sollen aus einem niedrig detaillierten BIM Modell (LOD 200) des geplanten Bauprojektes bezogen werden, statt wie bisher händisch erfasst zu werden. Dazu wird zunächst eine Discrete Event Simulation durchgeführt, um einen groben Bauablaufplan für das Gebäude zu erhalten. Die Bauteile werden anschließend mit den einzelnen Phasen verknüpft und an die Optimierung übergeben. Die Platzierung einer fest vorgegebenen Menge an Kranen sowie die Auswirkung der Abhängigkeit zwischen Krananzahl und benötigter Bauzeit sind weitere Aspekte des Modells, die einer näheren Betrachtung wert sind.

Literatur

- DUSCH, T. (2017), Optimierungsmodelle für die Positionierung von Baustelleneinrichtungsgegenständen, Bachelorarbeit, Technische Universität Kaiserslautern.
- SCHACH, R. & OTTO, J. (2008), Baustelleneinrichtung. B. G. Teubner Verlag.
- WOLSEY, L. A. (1998), Integer programming. Wiley-Interscience, New York.
- NEMHAUSER, G. L. & WOLSEY, L. A. (1988), Integer and combinatorial optimization. Wiley-Interscience, New York.
- SCHRIJVER, A. (1998), Theory of linear and integer programming. John Wiley & Sons.
- TAM, C. M., TONG, T. K. L. & CHAN, W. K. W. (2001), Genetic algorithm for optimizing supply locations around tower crane. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127 (4), 315-320.
- ABDELMEGID, M. A., SHAWKI, K. M. & ABDEL-KHALEK, H. (2015), GA optimization model for solving tower crane location problem in construction sites. *Alexandria Engineering Journal*, 54 (3), 519-526.
- CHAU, K. W. (2004), A two-stage dynamic model on allocation of construction facilities with genetic algorithm. *Automation in Construction*, 13 (4), 481-490.
- GERDTS, M. & LEMPIO, F. (2011), Mathematische Optimierungsverfahren des Operations Research. De Gruyter.
- SCHÖNEBURG, E., HEINZMANN, F. & FEDDERSEN, S. (1994), Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien. Addison-Wesley, Bonn.
- HUANG, C. & WONG, C. K. (2018), Optimization of crane setup location and servicing schedule for urgent material requests with non-homogeneous and non-fixed material supply. *Automation in Construction*, 89, 183-198.

Modifizierung eines kapazitiven Temperatur-Feuchte-Sensors zur Verwendung im Hochfeuchtebereich

Tim-Jonathan Huyeng

Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen · Technische Universität Darmstadt ·
Franziska-Braun-Straße 7 · 64287 Darmstadt ·
E-Mail: huyeng@iib.tu-darmstadt.de

Zur Einhaltung der Klimaziele, welche durch die Bundesregierung festgelegt wurden, sind Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Gebäudesektor erforderlich. Neben einer energieeffizienten Gestaltung von Neubauten können durch Sanierungen von Bestandsgebäuden erhebliche Einsparungen erreicht werden. Zur Untersuchung von Sanierungsmaßnahmen ist es neben Simulationen ebenfalls notwendig praktische Versuche durchzuführen. Hierbei sind insbesondere die Feuchtigkeits- und Temperaturwerte innerhalb des Mauerwerkes zu überwachen. Auf Grundlage der Messergebnisse ist eine Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen und deren Einsparpotential in Bezug auf Energieverluste möglich. Für die Erfassung der Feuchtigkeit im Mauerwerk im Rahmen eines Monitorings werden Sensoren benötigt, welche die relative Feuchtigkeit über einen langen Zeitraum möglichst mit einer ausreichend kleinen Messunsicherheit ($\pm 2\%$ r. F.) erfassen können. Hierbei werden die Sensoren teilweise über mehrere Monate bis hin zu mehreren Jahren sehr hoher Luftfeuchtigkeit ausgesetzt. Im Rahmen dieser Untersuchung wird ein typischer, in der Praxis eingesetzter, kapazitiver Feucht- und Temperatursensor ausgiebig untersucht. Bauteilbedingt sind diese Sensoren nicht für die Verwendung im Hochfeuchtebereich geeignet. Es wird daher demonstriert, wie der Sensor modifiziert werden muss, um zuverlässig Messungen im überhygroskopischen Feuchtebereich durchführen zu können. Die Messergebnisse des modifizierten Sensors wurden mit Hilfe von Laboruntersuchungen validiert.

Keywords: kapazitiver Temperatur-Feuchte-Sensor, Monitoring, überhygroskopischer Feuchtebereich, Modifizierung

1 Einleitung

Erhöhte Feuchtigkeit ist Schadensursache Nummer eins im Bausektor (WEBER & HAFKESBRINK 2016). Zum einen kann eine erhöhte Materialfeuchtigkeit zu einer Steigerung der Wärmeleitfähigkeit führen (ACHTZIGER & CAMMERER 1984), (CAMMERER 1995), (KRISCHER & KAST 1978), (S. SCHÄFER & BURGAB 2016). Zum anderen kann durch erhöhte Materialfeuchte und damit folgender hoher Oberflächenfeuchte gesundheitsgefährdender Schimmel und Pilzbewuchs entstehen (KÜNZEL 1994). Neben einem erhöhten Heizwärmebedarf aufgrund einer gesteigerten Wärmeleitfähigkeit ist auch für die Ertüchtigung feuchtigkeitsbedingter Schäden ein hoher Energieaufwand notwendig. Zur Einhaltung der Klimaziele, welche durch die Bundesregierung festgelegt wurden, sind Maßnahmen erforderlich, die den Energieaufwand im Gebäudebestand reduzieren (BMUB 2014). Insbesondere energetische Modernisierungen durch Reduktion der Feuchtigkeitsbelastung der thermischen Gebäudehülle liefern hier ein großes Einsparpotential. Zur Validierung von

Ertüchtigungsmaßnahmen ist es neben Simulationen ebenfalls notwendig, praktische Versuche durchzuführen. Im Rahmen eines Monitorings werden die Feuchtigkeitswerte innerhalb von Bauteilen wie zum Beispiel Mauerwerken über einen gewissen Zeitraum überwacht.

1.1 Hygrometrische Feuchtigkeitsmessung

Eine Bestimmung der Materialfeuchte mit Hilfe des hygrometrischen Verfahrens basiert darauf, dass sich in einem abgeschlossenem Raum, in dem sich ein kapillarporöser Baustoff befindet, nach einer bestimmten Zeit ein Dampfdruckgleichgewicht zwischen der Luftfeuchte des Raumes sowie der Materialfeuchte einstellt. Im Sorptionsfeuchtebereich ist dieser Zusammenhang durch die Sorptionsisotherme charakterisiert. Im Kapillarwasserbereich wird die Saugspannungskurve meist durch Saugspannungsmessungen ermittelt. Die aus beiden Kurven resultierende Speicherfunktion ist im Kapillarwasserbereich in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit sehr stark steigend (KRUS 1995). Aufgrund der starken Steigung ist eine genaue Ermittlung der Materialfeuchte nur durch eine präzise Erfassung der Luftfeuchtigkeit möglich. Bereits geringe Messabweichungen der gemessenen relativen Luftfeuchten haben einen erheblichen Einfluss auf die Ermittlung der Materialfeuchte. Daher werden für die Erfassung der Feuchtigkeit im Mauerwerk im Rahmen eines Monitorings Sensoren benötigt, welche die relative Feuchtigkeit über einen langen Zeitraum mit einer ausreichend kleinen Messunsicherheit ($\pm 2 \% \text{ r. F.}$) erfassen können. Üblich eingesetzte kapazitive Sensoren haben aufgrund des Messprinzips im Hochfeuchtebereich (über $80 \% \text{ r. F.}$) geringe Messgenauigkeiten.

2 Grundlagen

Nach Kenntnis des Autors wurde noch nicht untersucht, inwieweit eine regelmäßige Erwärmung des gewählten kapazitiven Sensors über einen bestimmten Zeitraum eine Abnahme der Messgenauigkeit im Bereich hoher Feuchte (über $80\% \text{ r. F.}$) verhindern kann. Die Problematik der Verringerung der Messgenauigkeit von kapazitiven Sensoren im Hochfeuchtebereich ist bereits von (PEPER u. a. 2010) sowie (S. SCHÄFER & BURGAB 2016) festgestellt worden. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein ausgewählter kombinierter Temperatur- und Feuchtesensor ausführlich kalibriert. Anschließend wurde eine Heizkappe zur Messung im Hochfeuchtebereich entwickelt und der Effekt auf den Sensor mit Laboruntersuchungen validiert.

2.1 Sensor

Der für diese Untersuchung ausgewählte Sensor (SHT75) der Firma *Sensirion* ist ein miniaturisierter und kombinierter Feuchte- und Temperatursensor. Der Sensor wurde aufgrund seiner hohen Genauigkeit der Feuchte- und Temperaturmessung, des Ausleseprotokolls und seinem verhältnismäßig günstigen Anschaffungspreis ausgewählt. Der Temperatursensor ist auf dem Chip integriert. Nach Herstellerangaben handelt es sich hierbei um einen Band-Gap-Temperatursensor (SENSIRION 2011). Bei der Feuchtigkeitsmessung wird mit der Messung der Kapazität eines Polymeres, welche sich durch die Auf- bzw. Abnahme von Wasser verändert, ein Rückschluss auf die umgebende relative Luftfeuchtigkeit gezogen. Der maximale Toleranzbereich des Herstellers, sprich die maximale absolute Abweichung des

Sensorwertes vom wahren Wert ist in Einsatzgebieten von 10 – 90 % r. F. $\pm 1,8$ % r. F. In dem Bereich von 0-10 sowie 90-100 % r. F. steigt die Toleranz linear auf $\pm 4,0$ % r. F. Die hier genannte absolute Genauigkeit der Feuchtemessung bezieht sich allerdings nur auf eine Messung, die bei 25 °C durchgeführt wird und ohne Beachtung einer Hysterese. Wird der Sensor mehr als 60 Stunden in einer Luftfeuchte von über 80 % r. F. eingesetzt, stellt sich nach Herstellerangaben eine Abweichung von + 3 % r. F. ein. Diese zusätzliche Abweichung wird als *Offset* bezeichnet. Die Einstellung dieses *Offsets* wird nachfolgend mit einem 60 Stundentest untersucht. Um im Hochfeuchtebereich valide Messergebnisse zu erreichen, muss durch die Weiterentwicklung eine Einstellung des *Offsets* verhindert werden.

2.2 Datenaufnahme

Für einen vollständigen Zugriff auf die Sensordaten wurde ein eigener Messaufbau entwickelt. Die Daten werden auf einem Server in einer Datenbank gespeichert und über ein Webinterface dargestellt. Das Backend wurde mit *Flask* in Python 3.6 implementiert. Zur Eintragungen und Auslesung der Daten über das HTTP-Protokoll wurden mit der Erweiterung *Flask-Restless* eine *Restful* API erzeugt (FINKELSTEIN 2015). Mit Hilfe der Erweiterung wurden verschiedene Endpoints erzeugt. Beispielhaft sind in Abbildung 1 die Endpoints für die Datenpunkte eines Sensors abgebildet.

GET	/api/data/	Returns list of datapoints as JSON
POST	/api/data/	Creates new datapoint
DELETE	/api/data/{id}	Deletes specific datapoint
GET	/api/data/{id}	Returns a datapoint as JSON
PATCH	/api/data/{id}	Updates datapoint information

Abb. 1: Endpoints der Flask-Restless-API zur Dateneintragung mit spezifischen Funktionen über HTTP.

Der Sensor wurde an einen Mikrocontroller angeschlossen. In Rahmen dieser Untersuchung wurde ein Controller mit integriertem *ESP8266* Chip verwendet. Der Controller ist in der Lage sich mit einem WLAN-Netz zu verbinden und über diese Verbindung die Daten an den jeweiligen Endpoint zu senden. Dies kann bei Bedarf über eine Internetverbindung erfolgen. Eine zentrale Datenspeicherung in einzelnen Messobjekten ist in diesem Fall nicht mehr notwendig, da ein zentraler Server genutzt wird. Dies ist allerdings nur möglich, wenn eine stabile Internetverbindung existiert. Ist es notwendig verlustfrei Daten zu erfassen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Zum einem können Daten auf dem Controller zwischen gespeichert werden, wenn die Eintragung über die API nicht erfolgreich war. Sobald wieder eine Verbindung besteht werden die gespeicherte Daten mitgesendet. Zum anderen kann, wie auch im Rahmen dieser Untersuchung eingesetzt, eine lokales WLAN-Netz erzeugt werden, indem auch der Server eingebunden ist. Dieses Sensor-WLAN-Netz lässt sich zum Beispiel mit einem *Raspberry Pi* umsetzen.

3 Kalibrierung und Weiterentwicklung

Es wurden sieben Sensoren hinsichtlich der gemessenen Temperatur- und Feuchtigkeitswerte kalibriert. Die Sensoren wurden teilweise vor der Kalibrierung bereits in Messungen eingesetzt. Die Einsatzdauer sowie die Bedingungen sind in Tabelle 1 angegeben. Zur Kalibrierung wurden Messaufbauten entwickelt, welche den zu kalibrierenden Parameter über einen gewissen Zeitraum ohne Einfluss von außen stabil halten.

Tabelle 1: Eingesetzte Sensoren bei der Kalibrierung

Sensor	SHT 1 - 4	SHT 5	SHT 6, SHT 7
Zustand	gebraucht	gebraucht	fabrikneu ¹
Dauer vorheriger Messung	Ca. drei Wochen	Eine Woche	-
Bedingungen Feuchtigkeit	Kurzeitig über 80 % r. F.	Unter 80 % r. F.	
Regeneriert	Ja ²	Nein	Nein

3.1 Temperaturkalibrierung

Die Sensoren wurden hinsichtlich der Genauigkeit der Temperaturmessung bzw. der Abweichung vom „richtigen Wert“ nach (DIN 1319-1 1995) untersucht. Der „richtige Wert“ ist im Rahmen der Temperaturkalibrierung der Wert des Referenzsensors (*Ahlborn PT 100* 0,2 K). Hierzu wurden die Sensoren mit dem Referenzsensor zwischen zwei Aluminiumblöcke in einer Klimakammer gelagert. Es wurden vier Temperaturstufen angefahren. Die Auswertung der Temperaturkalibrierung ergab, dass bis auf einen Sensor alle Sensoren die im Datenblatt angegebene Messtoleranzen einhalten.

3.2 Feuchtigkeitskalibrierung

Um eine stabile und gleichmäßige relative Feuchtigkeit bei allen Sensoren zu gewährleisten wurde ein Messaufbau entwickelt, in dem bis zu vier Sensoren sowie der Referenzsensor eingebaut werden können. Mit Hilfe von Salzlösungen wurden verschiedene Feuchtigkeitsstufen eingestellt. Zur Ermittlung einer möglichen Hysterese der Sensoren wurden vier Feuchtigkeitsstufen zuerst auf- und nachfolgend absteigend angefahren. Die Kalibrierwerte entsprechen der Differenz zum Referenzsensor. Als Referenzsensor wurde ein Taupunktspiegelhygrometer verwendet. Die in Abbildung 2 dargestellten Kalibrierwerte sind Mittelwerte der auf- und absteigenden Kalibrierung. Die Auswertungen der Sensoren SHT 1 – 5 zeigen Abweichungen, welche teilweise außerhalb der Toleranzen des Herstellers liegen. Nicht abschließend geklärt ist, ob die Abweichungen aufgrund der vorherigen Messungen besonders hoch sind.

¹ Erster Einsatz bei der Feuchtigkeitskalibrierung, anschließend Temperaturkalibrierung

² Nach Herstellerangaben vor Kalibrierung bei 105°C über 12 Stunden regeneriert (SENSIRION 2011)

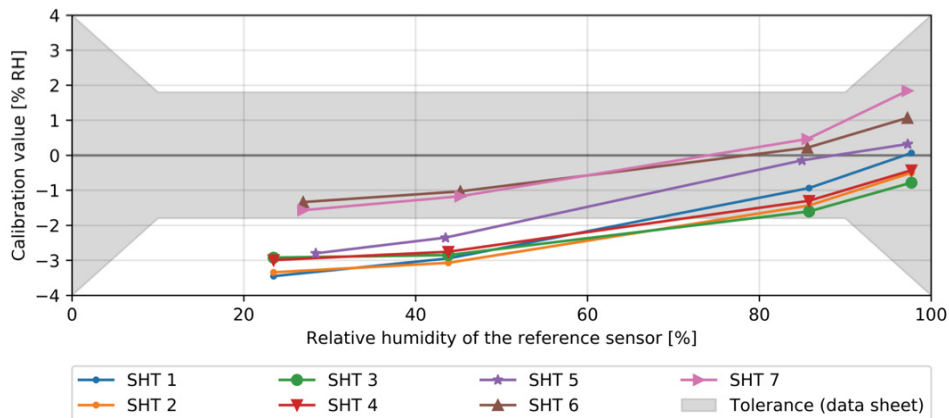


Abb. 2: Kalibrierwerte der Sensoren (Feuchtekalibrierung). Die hier dargestellten Werte sind die Mittelwerte der auf- und absteigenden Kalibrierung. Zusätzlich ist der Toleranzbereich des Herstellers eingezeichnet.

Die Kalibrierwerte von diesen Sensoren sind fast ausnahmslos negativ. Das heißt, die gemessenen Feuchtigkeiten liegen oberhalb des Referenzsensors. Unterhalb von 70 % r. F. liegen die Abweichungen zum Referenzsensor außerhalb der Toleranzen des Herstellers und sind mit maximal -3,5 % bei 22 % r. F. fast doppelt so hoch wie die Toleranz. Zu beachten ist hierbei, dass der Sensor 5 nur mit aufsteigenden Feuchtigkeitswerten kalibriert wurde. Die fabrikneuen Sensoren (SHT 6, SHT 7) halten die Toleranzen des Herstellers bei allen Feuchtigkeitsstufen ein. Mit Hilfe einer polynomischen Kalibrierfunktion 2. Grades ist ein gleichmäßiges Angleichen aller Sensordaten an den „richtigen Wert“ möglich.

4 Weiterentwicklung

Wird der Sensor im Hochfeuchtebereich über einen längeren Zeitraum eingesetzt, verändern sich die Materialeigenschaften des Polymers und es folgt eine Verringerung der Messgenauigkeit der Feuchtigkeitsmessung. Zur Regeneration des Sensors empfiehlt der Hersteller, den Sensor über 12 Stunden bei 105 °C auszubacken (SENSIRION 2011). Im Rahmen dieser Untersuchung wird überprüft, ob eine Beheizung des Sensors in regelmäßigen Zeitintervallen auf ca. 40 °C ebenfalls einen regenerativen Effekt hat und damit die Einstellung des beschriebenen *Offsets* verhindert werden kann. Zur Einstellung der Referenzfeuchten wurden Salzlösungen verwendet. Die relative Feuchtigkeit über den Salzlösungen ist nur gering von der Temperatur abhängig. Während der Beheizungsphase ist aufgrund der kurzen Zeit nicht davon auszugehen, dass sich die absolute Feuchtigkeit erhöht. Mit Hilfe einer Wärmestromsimulation wurde festgestellt, dass eine einstündige Beheizung auf das Mauerwerk keinen langfristigen Effekt hat.

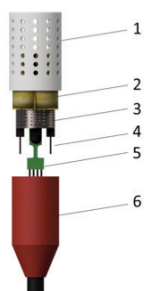


Abb. 3:
Explosionsansicht der entwickelten Heizkappe. 1) Oberteil, 2) Mineralwolle zur Dämmung, 3) Heizdraht um Metallgitter, 4) Kontakte der Heizung, 5) Sensors SHT75, 6) Unterseite

4.1 Entwicklung der Heizkappe

Zur Erwärmung der Sensoren wurde eine Heizung, welche in eine Kappe integriert wurde, entwickelt. Die tatsächliche Heizung besteht aus einem 1,5 m langen Kupferlackdraht, welcher doppelt gewickelt und verdreht wurde. Durch diesen Draht wird Strom mit einer bestimmten Leistung geführt, dies führt zu einer Erwärmung des Drahtes und damit auch zu einer Erwärmung des Luftraums um den Draht. Die Kappe besteht, wie in Abbildung 3 dargestellt, aus einem Oberteil sowie einem Unterteil. Der Kupferlackdraht wurde um ein Metallgitter gewickelt und mit Mineralwolle gedämmt in das Oberteil eingebaut. Im Unterteil sind die Halterung des Sensors sowie die Aufnahme der Stromkontakte der Heizung verbaut.

4.2 Praktische Versuche

Zur Verdeutlichung der Problematik bei Messungen über 80 % r. F. wurden zwei Sensoren über 60 Stunden in Feuchtigkeiten über 80 % r. F. gelagert. Die verschiedenen relativen Feuchtigkeiten wurden hierbei mit Hilfe von Salzlösungen eingestellt. Anschließend wurden die Sensoren erneut in den Feuchtekalibrieremessstand eingebaut und auf die Abweichungen zum Referenzsensor überprüft.

Tabelle 2: Sensordaten beim 60 Stundentest

	SHT 1	SHT 2
Mittelwert über 60 Stunde	82 %	92 %
Maximale Abweichung zum Referenzsensor	-1,8 % r. F.	-2,6 % r. F.

Es sind deutliche Abweichungen zum Referenzsensor feststellbar. Dies bestätigt, dass sich auch bei bereits kalibrierten Sensoren eine zusätzliche Abweichung durch den Einsatz im Feuchtebereich über 80 % einstellt. Zudem wird deutlich, dass es bei einer höheren Umgebungsfeuchte auch zu höheren Abweichungen kommt. Zur Validierung, inwiefern die Beheizung die bestätigte Veränderung der Sensorgenauigkeit verhindern kann, wurde ein Langzeittest mit drei Sensoren durchgeführt. Die Sensoren wurden hierzu in einen Kolbenaufbau über Kaliumsulfat eingebaut. Kaliumsulfat stellt im jeweiligen Kolben eine Referenzfeuchte von ca. 97 % ein. Zur Ermittlung, inwiefern die Beheizungsdauer einen Ein-

fluss auf den Effekt hat, wurde ein Sensor für eine Stunde und ein Sensor für eine halbe Stunde einmal am Tag beheizt. Der dritte Sensor wird nicht beheizt.

Messwerte von über 99 % r. F. sind nach den Angaben des Herstellers als 100 % zu definieren (SENSIRION 2011). Im Rahmen dieser Untersuchung wurde diese Begrenzung nicht eingehalten, um die Veränderung der Sensordaten auch über 100 % r. F. ermitteln zu können. Da sich durch die kurzzeitige Beheizung die Feuchtigkeitswerte während und nach der Heizphase ändern, werden nur die Feuchtigkeitswerte eine Stunde vor dem Start des nächsten Heizintervalls dargestellt und ausgewertet. Bei den Sensoren im Versuchsaufbau stellt sich nach einer gewissen Zeit ein stabiler Zustand ein (siehe Abbildung 4).

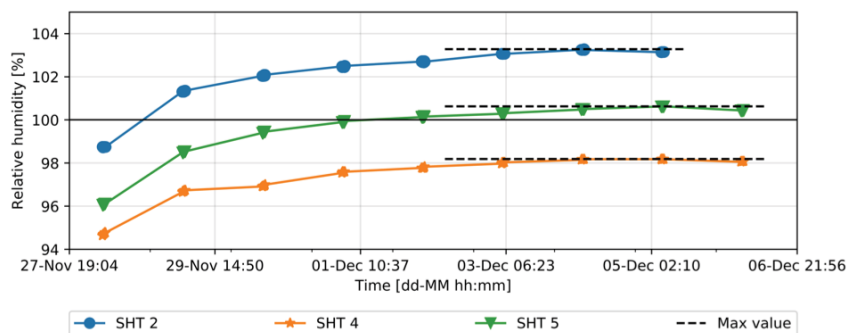


Abb. 4: Detailansicht der Feuchtigkeitswerte der Sensoren im Langzeittest. SHT 2 – unbeheizt, SHT 4 – einstündig beheizt, SHT 5 – halbstündig beheizt

Da die relative Luftfeuchtigkeit über einer Salzlösung im geringen Maße temperaturabhängig ist, wurden für die jeweiligen Temperaturen der Sensoren über die in (GREENSPAN & others 1977) angegebene Formel die spezifische relative Referenzluftfeuchtigkeit berechnet.

Tabelle 3: Übersicht über die Messdaten der Sensoren. Stabiler Zustand über Kaliumsulfaat. Die dargestellten Messdaten sind bereits mit den durch die Kalibrierung ermittelten Kalibrierwerte belegt.

Sensor	Heizung	Mittelwert	Referenz-Feuchtigkeit	Abweichung Mittelwert - Referenzfeuchte
	[h/d]	[% r. F.]	[% r. F.]	[% r. F.]
SHT 2	-	103,29	97,53	-5,76
SHT 5	0,5	100,52	97,55	-2,97
SHT 4	1	98,14	97,54	-0,60

Der Versuch zeigt deutlich, dass sich beim täglich einstündig beheizten Sensor eine deutliche geringe Abweichung zur Referenzfeuchte einstellt. Auch die halbstündige Beheizung jeden Tag verringert die Abweichung bereits. Mit einer absoluten Abweichung von - 3 % r. F. ist sie dennoch sehr hoch. Ohne die Begrenzung auf 100 % weicht der unbeheizte Sensor theoretisch fast - 6 % vom tatsächlichen Referenzwert ab. Der positive Effekt der

Beheizung mit einer Reduktion der Abweichung von fast 90 % wird durch diese Versuche bestätigt.

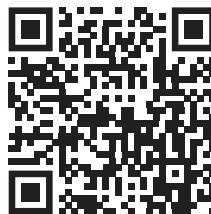
5 Fazit und Ausblick

Die Problematik der Verringerung der Messgenauigkeit von kapazitiven Sensoren im Hochfeuchtebereich konnte durch Versuche bestätigt werden. Zudem ist eine Kalibrierung der Sensoren vor einem Einsatz empfohlen, da die Sensoren durch vorherige Messung beeinflusst werden können. Es wird ebenfalls angeraten, die Sensoren nach einem längeren Einsatz erneut zu kalibrieren. Durch diese Kalibrierung können mögliche Veränderung der Sensoren über die Einsatzzeit festgestellt und erhobene Daten gegebenenfalls korrigiert werden. Die Weiterentwicklung erreicht durch regelmäßiges Beheizen des Sensors eine deutliche Verbesserung der Messgenauigkeit. Dies wird durch die vorliegenden Ergebnisse der praktischen Untersuchung und Vergleich mit einem unbeheizten Sensor bestätigt. Insbesondere beim hygrometrischen Verfahren ist eine exakte Erfassung der relativen Feuchtigkeit signifikant. Mit dem vorgestellten neuen Verfahren ist der Einsatz von kapazitiven Sensoren in diesem Bereich über einen längeren Zeitraum möglich. Eine Validierung von Ertüchtigungsmaßnahmen sowie die Erfassung von Feuchtigkeitsverläufen auch im Hochfeuchtebereich mit einer hohen Genauigkeit sind erstmalig durchführbar.

Literatur

- ACHTZIGER, J., & CAMMERER, J. (1984). Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Bericht zum Forschungsvorh. Nr. BI 5 - 800183-4. IRB-Verlag.
- BMUB. (2014). Aktionsprogramm Klimaschutz 2020. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB).
- CAMMERER, W. F. (1995). Wärme- und Kälteschutz: im Bauwesen und in der Industrie. Springer Berlin Heidelberg.
- DIN 1319-1. (1995). Grundlagen der Meßtechnik, Teil 1: Grundbegriffe. (Deutsches Institut für Normung e.V. & Normenausschuß Einheiten und Formelgrößen, Hrsg.). Beuth-Verlag, Berlin.
- FINKELSTEIN, J. (2015). Flask-Restless Dokumentation. Abgerufen von <https://flask-restless.readthedocs.io/en/stable/>
- GREENSPAN, L., & others. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. Journal of research of the national bureau of standards, 81(1), 89–96.
- KRISCHER, O., & KAST, W. (1978). Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer.
- KRUS, M. (1995). Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poroerer mineralischer Baustoffe: theoretische Grundlagen und neue Messtechniken (PhD Thesis). Universität Stuttgart.
- KÜNZEL, H. (1994). Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten (PhD Thesis). Universität Stuttgart.
- PEPER, S., KAUFMAN, D. B., HASPER, W., PFLUGER, D. R., & OCHS, D. F. (2010). Innendämmung und Wandfeuchte. In Tagungsband - 14. Internationale Passivhaustagung 2010 (S. 159–164). Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Feist.
- SCHÄFER, S., & BURGAß, R. (2016). Quantifizierung und Reduzierung von feuchtigkeitbedingten Wärmeverlusten im denkmalgeschützten Gebäudebestand (Zwischenbericht).
- SENSIRION, A. (2011). Data Sheet SHT7x (SHT71, SHT75)-Humidity and temperature sensor IC. Abgerufen von <http://www.sensirion.com/en/products/humidity-temperature/humidity-sensor-sht75>
- WEBER, J., & HAFKESBRINK, V. (2016). Bauwerksabdichtung in der Altbausanierung - Verfahren und juristische Betrachtungsweise. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.

**© Professur Informatik im Bauwesen
Bauhaus-Universität Weimar
2018**



ISBN: 978-3-00-060726-4

DOI: <https://doi.org/10.25643/bauhaus-universitaet>